Agriculture Canada

Manutention de produits agricoles

Entreposage et conditionnement des grains et fourrages

Canada

91-04654/

Manutention de produits agricoles

Entreposage et conditionnement des grains et fourrages

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada

Publication 1855/F
1990

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1990
Nº de cat. A15-1855/1990F
ISBN 0-660-92982-1
Imprimé en 1990

En vente au Canada par l'entremise de nos agents
libraires agréés et autres libraires, ou par la poste au

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa, Canada K1A 0S9

Prix sous réserve de modifications

Publié auparavant sous le titre : *Manuel de manutention des produits agricoles au Canada. 3.1 Entreposage et conditionnement des grains et fourrages.* Agriculture Canada, publ. 5002

Also available in English under the title
Handling Agricultural Materials. Storage and conditioning of grain and forage.

Données de catalogage avant publication (Canada)

Manutention de produits agricoles.
Entreposage et conditionnement des grains et fourrages /
[rédaction-édition, Normand Rousseau; conseiller scientifique,
recherches à contrat, L. Heslop].–

(Publication ; 1855/F)

Publié antérieurement sous le titre: Manuel de manutention
des produits agricoles au Canada.
3.1. Entreposage et conditionnement des grains et fourrages.
Publié aussi en anglais sous le titre: Handling agricultural
materials. Storage and conditioning of grain and forage.
"A été élaborée par la société UMA Engineering Ltd." – Av.-pr.
Comprend des références bibliogr.

No de cat. A15-1855/1990F
ISBN 0-660-92982-1

1. Céréales – Entreposage. 2. Céréales – Séchage.
3. Plantes fourragères – Entreposage. 4. Plantes
fourragères – Séchage. I. Rousseau, Normand, 1951-
II. Heslop, L. III. UMA Engineering Ltd. IV. Canada. Agriculture
Canada. Direction générale de la recherche. V. Coll.: Publication
(Canada. Agriculture Canada). Français ; 1855/F.

SB190.H3514 1990 633.1'0468 C91-099100-6F

Rédaction - édition
Normand Rousseau
Service aux programmes de recherche

Conseiller scientifique, recherches à contrat
L. Heslop, Bureau des relations avec l'industrie

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 5

1 **INTRODUCTION** 7

1.1 **Préservation de la qualité des grains à l'entreposage** 7
1.2 **Lutte contre les rongeurs, les insectes et les moisissures** 7
1.3 Contrôle du degré d'humidité 7
1.4 Réglage de la température 8
1.5 Utilisation de produits chimiques 8

2 **EFFETS DE L'HUMIDITÉ, DE LA TEMPÉRATURE ET DU TEMPS D'ENTREPOSAGE SUR LES GRAINS ENTREPOSÉS** 8

2.1 **Humidité et température** 8
2.2 Degré d'humidité équilibré 10
2.3 Détermination du degré d'humidité 11
2.4 Dispositifs de réglage de la température 12
2.5 **Temps d'entreposage** 12

3 **SYSTÈMES DE RÉGLAGE DE L'HUMIDITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE** 13

3.1 **Systèmes de ventilation** 13
3.2 Fonctionnement des ventilateurs 13
3.3 Direction du débit d'air 14
3.4 **Séchage à l'air naturel** 14
3.5 Conception et fonctionnement 15
3.6 Débit d'air 15
3.7 Facteurs favorables au séchage 15
3.8 Exposé général 15
3.9 **Séchage à l'air chaud** 21
3.10 Types de séchoirs 22
3.11 Séchoirs statiques 23
3.12 Séchoirs statiques pour cellules 23
3.13 Séchoirs portatifs 23
3.14 Séchoirs avec recirculation 24
3.15 Séchoirs à débit continu 25
3.16 **Systèmes de réglage de la température** 26
3.17 **Lecture de la température** 27
3.18 **Prévention des incendies** 27
3.19 **Sources d'énergie pour les séchoirs** 28
3.20 **Séchage à basse température** 28
3.21 **Utilisation de diverses méthodes de séchage** 29
3.22 **Refroidissement dans la cellule** 30
3.23 **Trempage et refroidissement dans la cellule (refroidissement lent différé)** 30
3.24 Gestion des systèmes de refroidissement lent différé 31
3.25 **Refroidissement et séchage dans la cellule** 32
3.26 Utilisation des systèmes de refroidissement et de séchage dans la cellule 32
3.27 **Choix des ventilateurs et conception du système** 32
3.28 **Exemples de calculs** 34
3.29 Paramètres du système de ventilation 34
3.30 Refroidissement de l'orge à l'entreposage 35
3.31 Séchage du blé à l'air naturel 36
3.32 Refroidissement lent différé du maïs 36

4 **CRITÈRES DE SÉLECTION DU SYSTÈME** 37

4.1 **Entreposage** 37
4.2 Taille des cellules d'entreposage 40
4.3 **Systèmes de séchage** 41
4.4 **Systèmes de chargement et de déchargement des séchoirs** 43
4.5 **Alimentation en courant électrique** 44
4.6 **Systèmes de manutention des produits** 44
4.7 Chargement 45
4.8 Déchargement 45

5 **ENTREPOSAGE ET CONDITIONNEMENT DU FOIN** 46

5.1 **Séchage du foin à l'entreposage** 46
5.2 Conditions d'entreposage sûr : débit d'air et pression statique 46
5.3 Systèmes de distribution d'air 48
5.4 **Séchage du foin** 50
5.5 Séchage dans le champ 50
5.6 Disposition du foin dans le séchoir 50
5.7 Fonctionnement du séchoir 50
5.8 Finition du séchage 51
5.9 **Séchage complémentaire à l'air chaud** 51

Bibliographie

Tableaux

1 Conditions favorisant la présence de ravageurs dans les silos à grains 9
2 Degrés d'humidité dans les principales espèces de grains 10

3 Débit d'air minimum recommandé au Manitoba pour une cellule d'entreposage avec un plancher tout perforé et une surface de grains plane 16
4 Débit d'air recommandé pour le séchage du blé à l'air naturel à Edmonton, en Alberta 19
5 Débit d'air recommandé pour le séchage du blé à l'air naturel à Swift Current, en Saskatchewan 19
6 Débit d'air recommandé pour le séchage du blé à l'air naturel à London, Ontario 20
7 Débit d'air minimum prévu pour le séchage du colza Canola au Manitoba 20
8 Effet de la date de récolte du maïs et du degré d'humidité initial sur le débit d'air pour le séchage à basse température du maïs à Toronto 21
9 Températures de séchage maximales 22
10 Conséquences sur la consommation de combustible et la capacité du séchoir pour diverses méthodes de séchage du maïs en réduisant de 25 à 15 % le degré d'humidité 28
11 Conception de base recommandée pour diverses méthodes de séchage et de refroidissement 35
12 Débit d'air selon la taille du séchoir et le degré d'humidité du foin 48
13 Régime du ventilateur et pression statique pour le séchage du foin en entreposage 49

Figures

1 Modèles de migration saisonnière de l'humidité : (A) printemps et été, (B) automne et hiver 8
2 Effet de la température et du degré d'humidité sur le temps d'entreposage acceptable pour le blé, l'avoine et l'orge 9
3 Effet de la température et du degré d'humidité sur le temps d'entreposage acceptable pour le colza Canola avec une ventilation continue 9
4 Effet de la température et du degré d'humidité sur le temps d'entreposage acceptable pour le maïs 10
5 Équilibre du degré d'humidité des céréales et oléagineux 11
6 Séchoir statique sans recirculation 23
7 Séchoir statique dans la cellule 23
8 Séchoir dans la cellule avec recirculation 24
9 Séchoir portatif avec recirculation 24
10 Séchoir à débit continu dans la cellule 25
11 Séchoir portatif à débit croisé continu 25
12 Séchoir portatif à débit parallèle continu 25
13 Trempage et refroidissement dans la cellule (refroidissement lent différé) 31
14 Résistance des grains et oléagineux au débit d'air 34
15 Disposition des conduits d'air pour les cellules d'entreposage plates 39
16 Espacement longitudinal des conduits pour les bâtiments rectangulaires 39
17 Conduits de distribution primaires non doublés. Toutes les mesures sont exprimées en millimètres 47
18 Conduits de distribution rectangulaires doublés 48
19 Installation du ventilateur pour l'absorption du bruit 52
20 Conséquences de la température et du temps d'entreposage sur la formation de moisissures dans le foin trop humide 52

AVANT-PROPOS

Manutention de produits agricoles est publiée en plusieurs parties à titre de guide pour les concepteurs de systèmes de manutention des produits destinés aux exploitations agricoles et aux industries connexes. Chaque section porte sur le choix et la conception de divers types d'équipement destiné à la manutention et au traitement des produits. Les appareils peuvent fonctionner indépendamment ou dans le cadre d'un système. Si on veut concevoir un système complet, il faudra consulter plusieurs sections du présent guide.

La présente section a été élaborée par la société UMA Engineering Ltd. de Winnipeg (Man.) pour le compte du Comité canadien du génie rural, Comité de coordination des services agricoles du Canada.

1 INTRODUCTION

La viabilité financière des exploitations agricoles repose, en grande partie, sur la manière dont les producteurs préservent la qualité et la quantité des cultures récoltées et ce, de la récolte à la vente sur le marché ou à leur utilisation pour nourrir le bétail.

Le grain exempt d'insectes et de moisissures a plus de valeur que le grain infesté. Une perte de la matière sèche ou des éléments nutritifs dans les fourrages mal entreposés signifie qu'il faut produire plus pour obtenir les mêmes résultats en viande, lait ou autres produits. Le Canada jouit de conditions atmosphériques relativement favorables à l'entreposage des grains et des fourrages. Les producteurs au pays trouvent donc plus facile de conserver les récoltes que ceux qui habitent dans des pays plus chauds. Néanmoins, des pertes à l'entreposage peuvent réduire le revenu net des producteurs canadiens; il est donc important d'assurer un contrôle des conditions d'entreposage.

Les systèmes d'entreposage varient selon un grand nombre de facteurs, y compris les conditions atmosphériques, le type de culture, le degré d'humidité, l'utilisation du produit ou les plans de mise en marché et les sources d'alimentation en courant électrique. Ce manuel vous sera utile pour tenir compte de tels facteurs dans l'installation de votre système d'entreposage.

1.1 Préservation de la qualité des grains à l'entreposage

La détérioration des grains à l'entreposage résulte d'habitude d'une infestation par :

- les rongeurs
- les insectes et les acariens
- les champignons et les moisissures

Éviter les infestations en limitant l'accès à l'eau et à la nourriture.

Il importe de construire les entrepôts de façon à empêcher l'entrée des rongeurs. Utiliser des planchers de ciment et des pierres de bordures sous le bâtiment et des plaques de poussée en acier autour des traverses de plancher dans les bâtiments à charpente de bois. Aussi, réparer toute fuite de tuyau et isoler les tuyaux suintants afin d'empêcher la formation de flaques d'eau.

Nettoyer les cellules avant de les remplir afin d'enlever le vieux grain qui attire les rongeurs et contient des insectes et moisissures qui peuvent infester la cellule. En nettoyant la cellule, vaporiser des insecticides dans les endroits où les insectes peuvent se cacher, comme les conduits de ventilation, les joints entre le mur et le plancher, et les raccords de panneaux.

Nettoyer les grains ayant tombé à l'extérieur des cellules afin d'éviter que les rongeurs, les insectes et les moisissures se multiplient. La propreté est surtout importante l'été en raison de l'activité des insectes et du transport des spores de moisissures par un vent chaud. Ces deux ravageurs peuvent contaminer les installations d'entreposage dans leur entourage.

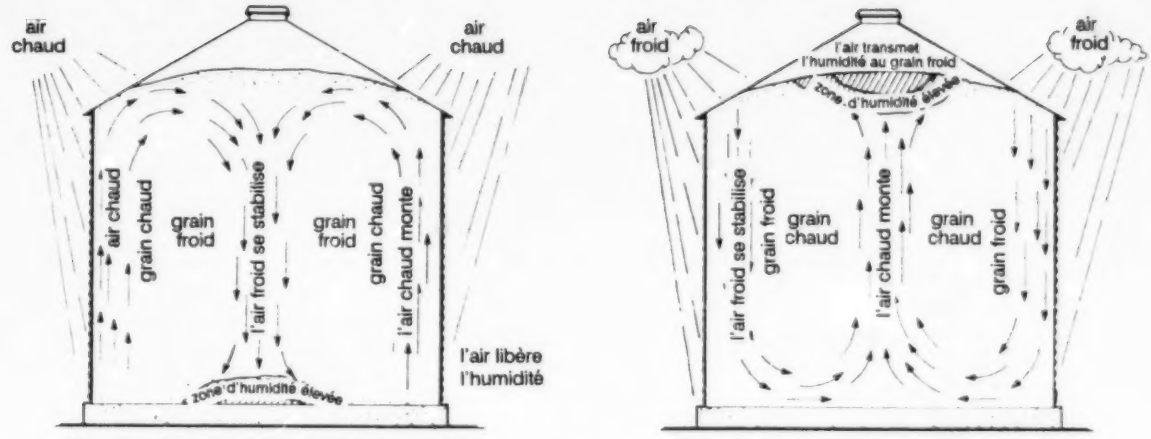
1.2 Lutte contre les rongeurs, les insectes et les moisissures

1.3 *Contrôle du degré d'humidité* Les insectes et les moisissures peuvent survivre dans un grain sec, mais ont besoin d'humidité pour se reproduire. Par conséquent, le grain à l'entreposage qui devient mouillé ou humide est une cible de choix pour une infestation. Il importe donc de prévenir l'accumulation de l'humidité dans la masse de grains et de bloquer l'accès à l'eau gravitaire dans la cellule.

La convection naturelle dans la cellule produit une concentration de l'humidité dans la masse de grains. Les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule favorisent la création de courants de convection. Mélanger et redistribuer la masse de grains. Utiliser les ventilateurs ou tourner le grain en déchargeant la cellule et en la rechargeant avec le même grain ou celui d'une autre cellule. Ces mesures empêchent d'importants écarts de température de produire des courants de convection. Les modèles de migration de l'humidité varient en fonction des saisons comme on le montre à la figure 1.

Une bonne conception et un entretien efficace du grenier à grains empêchent l'eau gravitaire de s'accumuler dans la masse de grains. Fermer les écoutilles d'inspection et d'accès afin d'assurer des connexions imperméables entre les cellules et leur base, et sceller les endroits où les cellules relient la toiture aux murs afin de prévenir l'entrée de la neige.

On peut aussi contrôler le degré d'humidité en utilisant une barrière de vapeur sous les planchers en ciment des cellules et en installant du ciment à haute densité. Ces deux mesures préviennent la migration de l'humidité à travers le plancher. S'il y a de l'humidité qui pénètre par le plancher, insérer un matériel granuleux (ne formant pas de mèches) sous le plancher de la cellule et élever



Migration de l'humidité au printemps et à l'été

Migration de l'humidité en automne et en hiver

Fig. 1. Modèles de migration saisonnière de l'humidité : (*A*) printemps et été, (*B*) automne et hiver.

le plancher de la cellule au-dessus du niveau adjacent.

Le séchage des grains à l'air naturel peut souvent entraîner une condensation de l'eau sous les toits de cellules en métal durant les nuits fraîches. L'eau peut couler sous le toit et dégoutter à divers endroits, habituellement autour de la périphérie, ce qui cause de l'humidité qui se concentre dans les grains. Utiliser des entrées d'air dans le toit afin de réduire ce problème de condensation. Dans les cas graves, en plus des entrées d'air, procéder à une surventilation au-dessus du grain; sortir l'air de cet espace plus vite que l'air qui se déplace dans les grains. Une bonne isolation du toit peut aussi aider à prévenir ce problème.

1.4 *Réglage de la température* La capacité de reproduction des insectes et des moisissures varie en fonction de la température du grain. Le grain récolté par temps chaud est particulièrement vulnérable aux insectes et aux moisissures, surtout lorsque le degré d'humidité est suffisant. Il importe de réduire la température du grain à moins 5 °C le plus tôt possible après la récolte afin de prévenir l'infestation par les insectes et les moisissures. Cela permet aussi de réduire les écarts de température entre la masse des grains et l'air extérieur, ce qui limite aussi les courants de convection naturels.

Vérifier souvent la température du grain afin de déceler tout dommage causé. Le grain sec entreposé à une température uniforme de moins de 5 °C ne se détériore pas à l'entreposage.

1.5 *Utilisation de produits chimiques* On peut aussi lutter contre les rongeurs et les insectes en utilisant des pesticides. Deux publications d'Agriculture Canada fournissent des renseignements détaillés sur le choix et l'utilisation des pesticides (Loschiavo 1976, *Lutte contre les rats et les souris* 1979, Cessna, 1988).

L'utilisation de produits chimiques pour lutter contre les insectes et les moisissures présente un risque pour la santé de l'utilisateur ainsi que pour celle des enfants, du bétail et des animaux de compagnie. N'utiliser ces produits que dans les cas d'infestation ou si le grain commence à se détériorer. Toutefois, en suivant les conseils fournis dans ce manuel, il devrait être possible d'éviter de tels problèmes.

2 EFFETS DE L'HUMIDITÉ, DE LA TEMPÉRATURE ET DU TEMPS D'ENTREPOSAGE SUR LES GRAINS ENTREPOSÉS

2.1 Humidité et température

Les conditions idéales pour la reproduction et la croissance varient selon chaque espèce d'insectes, d'acariens ou de moisissures. Toutefois, il est possible d'établir certaines caractéristiques générales pour les ravageurs des grains entreposés. Vous trouverez au tableau 1 les conditions recommandées pour prévenir une perte totale des grains entreposés (par d'autres moyens que l'utilisation de produits chimiques).

Pareillement, chaque espèce de grains fait preuve d'une capacité différente de supporter des conditions d'entreposage sans perte, germination ou formation de moisissures. Les

Tableau 1 Conditions favorisant la présence de ravageurs dans les silos à grains

	Insectes	Acariens	Moisissures
Température minimum pour la reproduction	17 °C	5 °C	—
Degré d'humidité minimum pour la reproduction	sec	sec	gourd
Température minimum pour les rendre actifs	8 °C	3 °C	−8 °C

Référence : Sinha (1971), Loschiavo (1976).

grains atteignent un degré d'humité stable pour l'entreposage quand l'humidité relative entre les grains est moindre que le seuil d'humidité pour la propagation des moisissures. Le tableau 2 indique les degrés d'humidité recommandés pour plusieurs espèces de grains.

Afin de prolonger la durée d'entreposage du grain, il faut contrôler à la fois la température et le degré d'humidité. On illustre aux figures 2, 3 et 4 la durée d'entreposage des grains selon divers degrés d'humidité et différentes températures.

Toutefois, si la température du grain s'élève, le taux de croissance des moisissures et d'infestation par les insectes augmente également pour causer un taux exponentiel d'augmentation de la température. De plus, l'entreposage sans ventilation entraîne une accélération de la détérioration du grain et une plus forte hausse de la température qu'on pourrait prévoir. La figure 3 démontre les effets d'une ventilation continue sur l'entreposage du colza Canola.

Des poches d'humidité dans certains endroits d'une masse de grains sèche peuvent découler d'une infestation d'insectes, de concentrations de grains non mûrs ou d'une migration de l'humidité. L'activité dans ces poches d'humidité peut générer de la chaleur dans une masse de grains qu'on pense sèche et fraîche.

Chaque fois que c'est possible, réduire la température de la masse de grains à moins de 5 °C. Une autre solution possible consiste à réduire le degré d'humidité de la masse de grains afin de prévenir les infestations d'insectes ou d'acariens qui peuvent entraîner une hausse de température du grain (tableau 1; figures 2, 3 et 4).

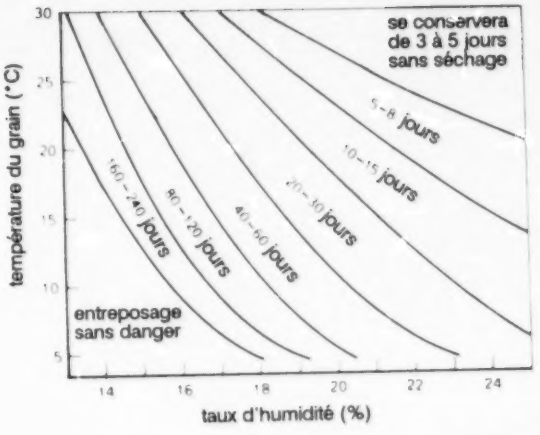


Fig. 2. Effet de la température et du degré d'humidité sur le temps d'entreposage acceptable pour le blé, l'avoine et l'orge.

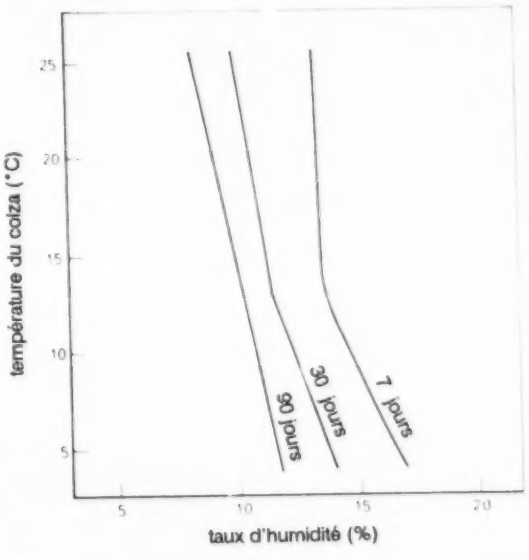


Fig. 3. Effet de la température et du degré d'humidité sur le temps d'entreposage acceptable pour le colza Canola avec une ventilation continue.

Comme les insectes et les acariens se reproduisent rapidement, il importe de refroidir le grain le plus tôt possible après la récolte, surtout par temps chaud lorsque la température atteint 15 °C ou plus. Sans ventilation, le grain se refroidit lentement en entreposage et conserve la température de récolte pendant de longues périodes.

Bref, voici les facteurs qui peuvent endommager le grain :

- les grains non mûrs
- les grains mûrs qui contiennent plus d'humidité que la moyenne des grains

Tableau 2 Degré d'humidité dans les principales espèces de grains

Espèce	% du poids		
	Sec	Gourd	Humide
Blé	14,5	14,6–17,0	>17,0
Orge	14,8	14,9–17,0	>17,0
Avoine	14,0	14,1–17,0	>17,0
Seigle	14,0	14,1–17,0	>17,0
Lin	10,5	10,6–13,5	>13,5
Colza Canola	10,0	10,1–12,5	>12,5
Sarrazin	16,0	16,1–18,0	>18,0
Maïs	15,5	15,6–17,5	17,6–21,0
Pois	16,0	16,1–18,0	>18,0
Tournesol	9,5	9,6–13,5	13,6–17,0
Moutarde	10,5	10,6–12,5	>12,5
Millet	12,0	—	—
Soja	14,0	14,1–16,0	16,1–18,0
Lentilles	14,0	14,1–16,0	>16,0
Triticale	14,0	14,1–17,0	>17,0
Haricots blanc	18,0	18,1–21,5	>21,5

Remarque : On considère sans danger d'entreposer le colza Canola pour l'hiver avec un degré d'humidité de 8,5 %. On peut seulement entreposer les autres grains lorsqu'ils sont secs.

Référence : *Grain grading handbook for western Canada*. (Guide sur le classement des grains pour l'Ouest canadien).

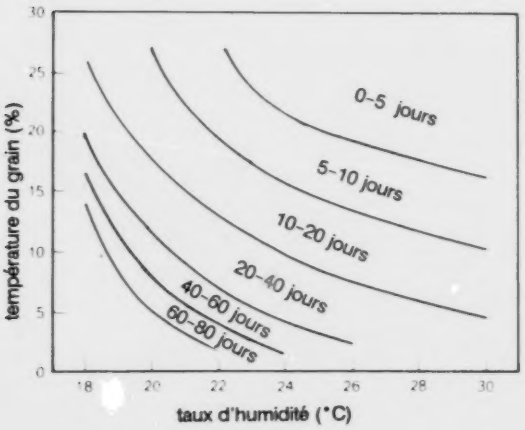


Fig. 4. Effet de la température et du degré d'humidité sur le temps d'entreposage acceptable pour le maïs.

- des quantités supérieures à la moyenne de grains endommagés et de matériel fin

Les grains qui ne sont pas mûrs contiennent plus d'humidité et produisent une plus grande chaleur de respiration que les grains mûrs. Vous pouvez prévenir la concentration de grains non mûrs dans certains endroits des cellules d'entreposage en tournant le grain. De plus, utiliser un épandeur de grains pour le chargement des cellules et maintenir un degré d'humidité et une température convenables.

La réhumidification du grain, de mauvaises méthodes de séchage ou la migration de l'humidité dans la cellule peuvent entraîner la formation de poches de grains humides. Prendre des mesures semblables à celles décrites pour défaire les poches de grains non mûrs.

Les insectes s'attaquent plus souvent aux grains endommagés ou fins parce qu'ils ont alors plus facilement accès à la nourriture à l'intérieur des grains. Il est aussi plus difficile de refroidir ces grains endommagés ou fins, qu'on appelle des impuretés, en raison de leur forte résistance au débit d'air. Tourner le grain en entreposage et utiliser un épandeur de grains pour le chargement afin de distribuer uniformément les impuretés. Vérifier la méthode de chargement de la cellule afin de ne pas répéter les mêmes erreurs lorsque vous tournez le grain. Souvent, les dispositifs de chargement ne répartissent pas les impuretés de façon uniforme. Toutefois, s'il est impossible de les répartir uniformément, nettoyer les cellules afin d'enlever tout excès d'impuretés.

2.2 *Degré d'humidité équilibré* Le degré d'humidité est équilibré lorsque la pression partielle de la vapeur d'eau dans le grain égale celle dans l'air. L'humidité relative (HR) de l'air en équilibre avec le degré d'humidité dans du matériel est connue sous le nom d'équilibre

de l'humidité relative. Le grain relâche de l'humidité dans l'air (au séchage) quand l'humidité relative de l'air est moindre que l'équilibre de l'humidité relative. Par contre, le grain absorbe de l'humidité quand l'HR de l'air dépasse l'équilibre de l'humidité relative. Le seuil d'équilibre varie selon la température et le type de grain.

Quand l'air ambiant se déplace dans le grain, soit que le grain libère de l'humidité dans l'air ou absorbe de l'humidité contenue dans l'air selon l'humidité relative de l'air, le degré d'humidité du grain ainsi que la température à la fois du grain et de l'air.

La figure 5 illustre les effets de deux importants facteurs pour le séchage du grain. Au fur et à mesure que sèche le grain, le taux de séchage diminue considérablement étant donné que les pressions de la vapeur de l'air et du grain commencent à s'égaliser. De plus, la capacité de l'air ambiant de sécher le grain diminue lorsque les températures baissent. Par conséquent, la capacité de l'air ambiant d'enlever l'humidité du grain est directement proportionnelle à l'évaporation nette dans une région géographique donnée.

2.3 *Détermination du degré d'humidité* Pour une détermination rapide du degré d'humidité, on peut utiliser des vérificateurs de la résistance électrique. Se servir de vérificateurs ayant démontré de la précision pour la plupart des espèces de grains et un grand éventail de degrés d'humidité. Ne pas oublier de recalibrer les vérificateurs toutefois pour chaque espèce de grains.

Quand vous utilisez un séchoir à air chaud pour les grains, prévoir une certaine réhumidification après le séchage lorsque

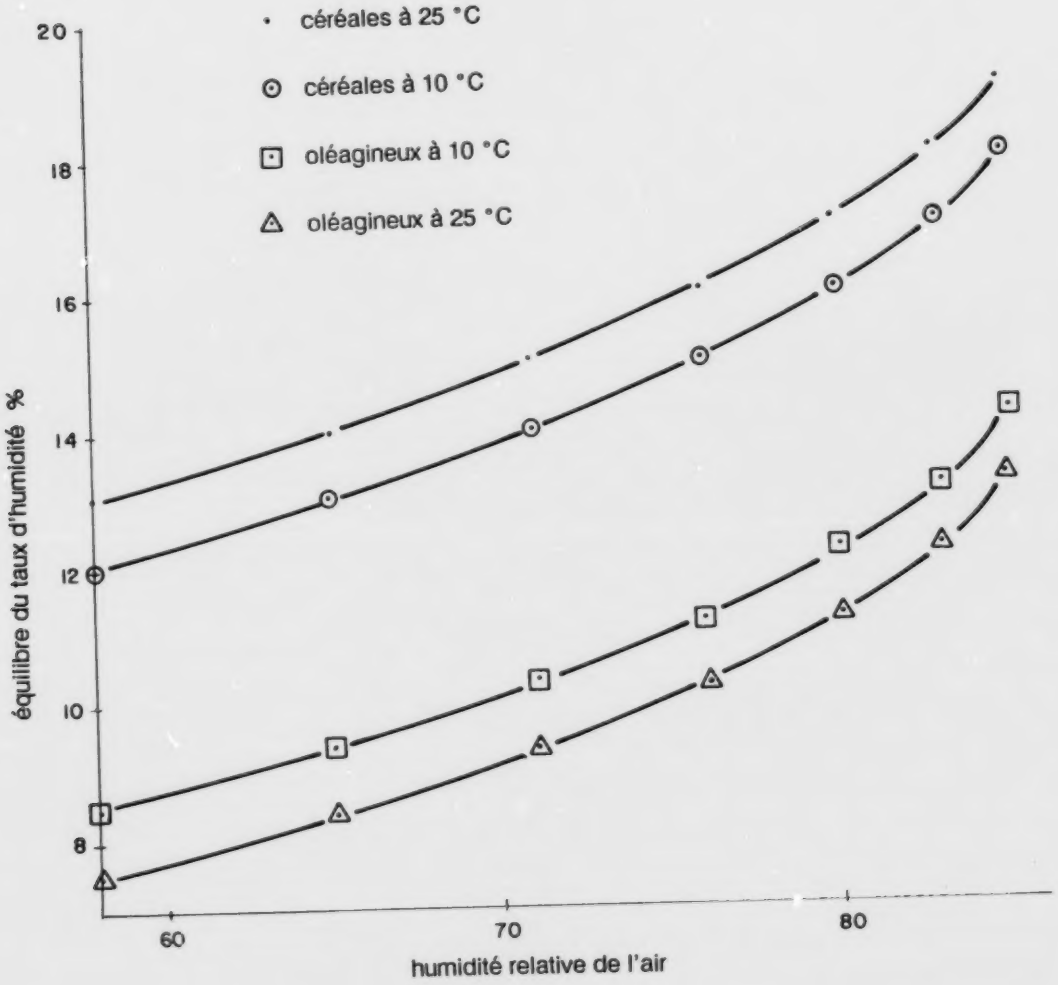


Fig. 5. Équilibre du degré d'humidité des céréales et oléagineux.

l'humidité du grain cherche à se stabiliser à nouveau. La réhumidification peut se produire si vous mesurez avec un simple vérificateur l'humidité dans les couches de surface des grains. Ces couches sèchent plus rapidement que celles du centre. Alors, le vérificateur enregistre un faible degré d'humidité immédiatement après le séchage.
La réhumidification est négligeable lorsqu'on enlève seulement une petite quantité d'humidité dans les grains. Toutefois, la réhumidification atteint souvent 1 à 1,5 % quand on élimine un degré d'humidité de 10 % ou plus dans les grains.

Afin de tenir compte de la réhumidification et de mesurer le degré d'humidité avec précision, attendre que la température se soit stabilisée dans tout le grain avant d'utiliser le vérificateur.

On peut aussi résoudre le problème de réhumidification en surséchant le grain d'environ 1 %. Dans ce cas, avant de vérifier le degré d'humidité de l'échantillon, écraser le grain et le sceller dans un sac de plastique afin de prévenir la perte d'humidité et le laisser refroidir jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante.

Plusieurs publications de l'American Society of Agricultural Engineers (ASAE) décrivent des méthodes standard pour déterminer le degré d'humidité dans les grains, les semences et les fourrages. En fait, l'exactitude de tous les types de vérificateurs d'humidité est mesurée par rapport aux fours de séchage de l'ASAE.

2.4 *Dispositifs de réglage de la température*
Mesurer la température est la façon la plus simple et la plus pratique de vérifier l'état du grain entreposé. Cela permet de découvrir toute source de chaleur ou si la propagation d'insectes et d'acariens menacent la qualité du grain.

De faibles augmentations de la température nécessitent un examen plus poussé. Il importe de garder un registre exact des températures constatées afin de pouvoir déceler et évaluer même de faibles écarts de température.

Placer des lecteurs de température à au moins trois endroits dans les grains afin de mesurer efficacement la température de la masse entreposée. Voici de bons endroits où les placer dans la cellule d'entreposage : au centre supérieur (de 0,5 à 1 m sous la surface), au centre inférieur (de 0,5 à 1 m au-dessus du plancher) et du côté sud (de 0,1 à 0,5 m du mur extérieur, soit dans la moitié de la cellule).

Puisqu'il y a une migration de l'humidité dans la cellule, l'humidité produite par la convection interne a tendance à s'accumuler aux centres supérieur et inférieur. En vérifiant les écarts de température à partir de l'extérieur jusqu'au centre, vous pouvez déceler tout changement de température de la masse de grains et déceler assez rapidement l'humidité dans le grain. Une température uniforme dans toute la masse entreposée garantit les meilleures conditions d'entreposage possibles.

Parmi les lecteurs de température les plus communs, on trouve les thermocouples, les thermistors et les thermomètres à dilatation de gaz. Les thermocouples et les thermistors ne sont pas très chers mais ils nécessitent des compteurs coûteux pour interpréter les signaux obtenus. Les thermomètres à dilatation de gaz sont souvent moins chers, mais ils sont plus utiles comme sondes ou dans des lieux fixes.

Utiliser des thermocouples et des thermistors quand vous devez mesurer régulièrement la température dans plusieurs cellules. Ces dispositifs peuvent demeurer dans les cellules étant donné qu'ils transmettent des signaux à des compteurs à l'extérieur des cellules.

Doter de lecteurs de température toutes les cellules ayant plus de 300 m^3. Toutefois, il peut être utile d'installer un lecteur dans une cellule de n'importe quelle taille, surtout si le grain entreposé est humide ou sensible à la chaleur comme le colza Canola.

2.5 Temps d'entreposage

Le temps d'entreposage est le facteur le moins souvent utilisé pour réduire les problèmes d'entreposage du grain.

Il importe de concevoir des systèmes d'entreposage pour répondre à des demandes variées concernant le temps d'entreposage. Avec un bon système, l'exploitant peut tirer avantage du facteur temps et en profiter du point de vue financier.

Supposer une charge de blé nº 2 avec un degré d'humidité de 18 % récoltée le 5 septembre. L'exploitant doit se poser les questions suivantes :

- Faut-il sécher le grain?
- Faut-il refroidir le grain en vue de le vendre comme blé nº 2 humide?
- Faut-il le refroidir afin de le vendre plus tard comme blé de fourrage?
- Faut-il le refroidir pour le donner à son propre bétail?
- Faut-il le laisser sécher dans le champ avant de le récolter? Dans ce cas, il ne s'agira peut-être plus de blé nº 2.

L'exploitant peut seulement répondre à ces questions s'il connaît toutes les données suivantes :

- les stocks de grains disponibles
- les besoins en matière de fourrage
- la situation relative aux impôts
- les conditions du marché
- la capacité de prendre des risques.

La conception de l'installation d'entreposage ne doit pas imposer de contraintes supplémentaires.

3 SYSTÈMES DE RÉGLAGE DE L'HUMIDITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE

L'air qui se déplace dans la masse de grains influe sur le degré d'humidité et la température du grain. Le débit, la température et le degré d'humidité de l'air qui conviennent varient selon les objectifs du séchage.

Voici les quatre principaux systèmes de séchage du grain :

- la ventilation
- le séchage à l'air naturel
- le séchage à l'air chaud
- une combinaison de méthodes de séchage.

La ventilation préserve la qualité du grain sec et élimine les écarts de température et d'humidité dans toute la cellule.

Le séchage à l'air naturel (ou non chauffé) permet d'utiliser l'air ambiant pour laisser le grain sécher. Cette méthode n'enlève qu'un degré limité d'humidité excessive.

Dans le séchage à l'air chaud, on utilise de la chaleur supplémentaire pour sécher le grain. Ajouter la chaleur à l'air ambiant augmente l'écart de la pression de vapeur entre le grain et l'air, réduisant ainsi le temps de séchage.

Une combinaison des diverses méthodes de séchage fait appel à la ventilation, au séchage à l'air naturel ou au séchage à l'air chaud. On parle alors de refroidissement lent différé, de ventilation et de refroidissement, et d'une variante de la méthode de ventilation et de refroidissement. On peut utiliser une telle combinaison de méthodes durant le refroidissement afin d'extraire du grain les derniers 1 à 6 % d'humidité.

3.1 Systèmes de ventilation

Se servir de ventilateurs pour :

- refroidir le grain sec pour l'entreposer aux plus basses températures possible
- établir et maintenir une température et un degré d'humidité uniformes dans toute la masse de grains.

La ventilation du grain entreposé requiert un débit d'air minimum de 1(L/s) m^3. Avec ce débit d'air, le grain se refroidit uniformément et atteint la température ambiante dans une période d'environ 150 à 200 h. Si l'on double le débit d'air, le grain se refroidit deux fois plus vite.

Des débits d'air supérieurs aux minimums recommandés augmentent les possibilités d'entreposage. Une ventilation de 2 à 6 (L/s) par mètre cube de grains permet de réduire le temps d'utilisation des ventilateurs. Avec un tel débit, le grain se refroidit bien et atteint une température uniforme. Par la même occasion, la ventilation réduit les risques d'accumulation d'humidité dans le grain gourd entreposé.

La température idéale du grain présente un écart inférieur à 5 °C par rapport à la température ambiante moyenne. Toutefois, il est plus pratique de conserver le grain à moins 5 °C durant l'hiver et de le réchauffer à 10 °C au printemps.

Mesurer la température du grain dans la cellule afin de vérifier si elle est uniforme dans toute la masse. S'il existe des écarts de température, l'humidité peut se déplacer dans la cellule et réduire le temps d'entreposage possible. Une utilisation des ventilateurs pendant une période convenable garantit une température uniforme.

La migration de l'humidité dans une cellule crée des accumulations de liquide au centre supérieur de la cellule durant l'hiver et au centre inférieur durant l'été. Vérifier souvent ces endroits. Puisque le centre inférieur est difficile d'accès, on peut seulement le vérifier en mesurant la température. Toutefois, il est moins important de vérifier le fond de la cellule d'entreposage si l'on peut le ventiler.

La ventilation ne permet pas de sécher le grain trop humide, mais dans des conditions idéales, une partie de l'humidité est éliminée. Éviter de réduire la quantité de matériel vendable en séchant trop le grain.

Un système de ventilation bien conçu est nécessaire pour tirer avantage d'une augmentation du débit d'air, d'un refroidissement accéléré ou de l'entreposage du grain gourd. L'exploitant doit aussi comprendre les effets des conditions ambiantes sur la conservation du grain entreposé.

3.2 *Fonctionnement des ventilateurs* Durant la récolte, le principal objectif consiste à refroidir le grain. Il importe de faire fonctionner continuellement les ventilateurs pendant et

après le chargement de la cellule tant que la température de la sortie d'air sera supérieure de 5 °C à la température quotidienne moyenne. Le refroidissement du grain à moins de 5 °C nécessite en général plusieurs périodes d'utilisation continue des ventilateurs au fur et à mesure que la température ambiante diminue. Ne pas tenir compte de l'humidité relative de l'air ambiant lorsque vous refroidissez le grain. Continuer d'utiliser les ventilateurs même par temps humide, car le refroidissement du grain est plus important que toute réhumidification qui peut se produire. Faire fonctionner les ventilateurs pour une journée ou deux après un temps humide afin d'enlever tout excès d'humidité dans la cellule d'entreposage.

Le centre supérieur de la cellule se refroidit en dernier si l'air est poussé vers le haut. Si l'air est poussé vers le bas, alors le centre inférieur se refroidit en dernier. Le refroidissement est terminé lorsque la température à ces deux endroits atteint 5 °C ou moins.

Durant l'hiver, maintenir une température uniforme en faisant fonctionner les ventilateurs pendant un jour ou deux quand la température ambiante approche celle du grain entreposé. De grands froids nuisent à l'uniformité de la température dans la cellule et augmentent les risques de migration de l'humidité. Le froid d'hiver entraîne aussi une condensation sur les conduits d'aération près du grain.

Quand le ventilateur n'est pas utilisé, garder un couvercle sur le ventilateur ou le conduit. Cela permet de :

- prévenir que le grain près du conduit ne se refroidisse trop par les grands froids d'hiver
- prévenir que la pluie ou la neige entre dans la cellule
- bloquer l'accès de la cellule aux rongeurs.

Réchauffer le grain au printemps, surtout s'il faut l'entreposer tout l'été et si la température du grain est de 0 °C ou moins. Commencer à le réchauffer au printemps lorsque la température ambiante moyenne atteint le jour 5 °C de plus que celle du grain. Réchauffer le grain par étapes afin qu'il atteigne finalement une température de 10 °C et choisir des moments où l'humidité relative est inférieure à 70 %. Réchauffer le grain de cette façon réduit les risques de condensation sur le grain et de réhumidification du grain s'il absorbe l'humidité.

Faire fonctionner continuellement les ventilateurs durant le chauffage afin de veiller à garder une température uniforme dans la cellule. Il peut se produire de la condensation et des dommages en quelques jours si l'on ferme les ventilateurs avant que le grain n'ait atteint une température uniforme.

Durant l'été, tirer avantage du temps frais quand la température baisse à 15 °C ou moins afin de rétablir une température uniforme. Ne pas faire fonctionner les ventilateurs si la température ambiante dépasse celle du grain, sauf pour terminer la période nécessaire à l'établissement d'une température uniforme.

3.3 *Direction du débit d'air* La décision de diriger l'air de haut en bas ou de bas en haut dans le grain repose sur plusieurs facteurs. Voici des renseignements qui vous aideront à décider quelle méthode utiliser dans la conception de systèmes de ventilation pour le séchage.

Faire sortir l'air du fond de la cellule d'entreposage entraîne un avantage important, car cela permet d'éliminer la condensation sous le toit tout en refroidissant le grain chaud par temps froid.

Toutefois, parmi les désavantages, la sortie d'air par le plancher de la cellule peut causer une accumulation de l'humidité au centre inférieur qui est difficile d'accès pour effectuer des contrôles de la qualité. Afin d'éviter un tel problème, fixer un lecteur de température à cet endroit et enlever périodiquement une petite quantité de grains du centre inférieur afin de déceler tout dommage possible.

Par ailleurs, la sortie d'air par le plancher pose un problème étant donné qu'elle réchauffe le grain refroidi au fond de la cellule si du grain chaud est ajouté sur le dessus ou si la chaleur du soleil fait augmenter la température sous le toit de la cellule durant le refroidissement.

La sortie d'air au-dessus de la cellule d'entreposage comporte quatre avantages importants. Elle offre un accès facile pour la vérification de l'endroit le plus vulnérable aux dommages (le centre supérieur). Elle simplifie aussi la lecture de la température afin de déterminer quand la ventilation est complète.

La sortie d'air au sommet de la cellule aide à garder les perforations propres durant le chargement de la cellule, surtout lorsque les ventilateurs commencent à fonctionner avant le chargement. Enfin, elle empêche la chaleur du soleil réchauffant le toit et l'espace au-dessus du grain entreposé de le réchauffer, un avantage particulièrement important au printemps et à l'été.

Toutefois, un grand désavantage de la sortie d'air au sommet de la cellule est que la condensation se formant sur le toit de la cellule peut dégoutter sur le grain.

3.4 Séchage à l'air naturel

L'air ambiant non chauffé peut sécher le grain entreposé à condition que l'équilibre de l'humidité relative correspondant au degré d'humidité du grain soit supérieur à l'humidité relative de l'air ambiant. Le taux de séchage doit dépasser le taux de développement d'impuretés dans le grain. Le taux de séchage augmente avec une hausse de la température ambiante, mais il faut se souvenir que de telles conditions favorisent aussi le développement d'impuretés. Par ailleurs, l'équilibre du degré d'humidité augmente avec une baisse de la température du grain, ce qui limite davantage le taux de séchage déjà réduit par l'enthalpie inférieure de l'air plus frais.

3.5 *Conception et fonctionnement* L'air poussé dans le grain entreposé sèche d'abord le grain qu'il touche en premier. En passant à travers le grain, il absorbe de l'humidité jusqu'à ce que son humidité relative corresponde au degré d'humidité du grain. Par conséquent, il passe à travers le reste du grain sans le sécher.

La profondeur du grain coïncidant avec l'absorption d'humidité par l'air est appelée la zone de séchage. L'épaisseur et la vitesse de séchage de cette zone varie selon le débit d'air, les conditions ambiantes et le degré d'humidité du grain. Afin de prévenir les dommages au grain, la zone de séchage doit passer à travers toute la masse de grain durant le temps d'entreposage recommandé. Le séchage à l'air naturel consiste donc en une course contre la montre afin de sécher le grain avant qu'il ne s'endommage.

D'habitude, un ventilateur pousse l'air vers le haut de la cellule de sorte que le grain à la surface sèche en dernier. Durant le séchage, surveiller le grain de près dans cet endroit afin de déceler tout signe de chaleur et de déterminer quand la zone de séchage s'est déplacée. Si la température du grain augmente, le placer aussi vite que possible dans un séchoir à air chaud afin de réduire les risques de dommages.

Avec un système de séchage à l'air naturel, l'exploitant peut seulement contrôler le débit d'air. Un fort débit d'air déplace plus rapidement une plus grande zone de séchage dans la masse de grains. Une fois établie, la zone de séchage se déplace dans le grain tant que le ventilateur fonctionne. Par conséquent, il importe d'utiliser le ventilateur de façon continue jusqu'à ce que la zone ait passé dans toute la masse de grains ou que le grain ait atteint une température convenable pour un entreposage sûr. Il faut s'attendre à ce que le grain le plus près du ventilateur devienne trop sec par beau temps et se réhumidifie par temps humide.

Continuer de faire fonctionner le ventilateur jusqu'à ce que le grain soit sec ou qu'il ait atteint une température convenable pour un entreposage sûr (fig. 2, 3 et 4). Il faut entreposer les grains céréaliers et le maïs à une température de 0 à −5 °C avec un degré d'humidité de 15 à 18 %. Il n'est pas nécessaire de le sécher plus si l'on prévoit utiliser le grain pour du fourrage durant l'hiver. Autrement, il faut sécher complètement les céréales et le maïs en faisant fonctionner continuellement le ventilateur durant le printemps aussitôt que le permettra la température ambiante. Le séchage se produit rapidement au printemps lorsque les conditions ambiantes le favorisent normalement.

3.6 *Débit d'air* Régler le débit d'air selon :

- le type de grains et le degré d'humidité
- la date de récolte
- les conditions atmosphériques d'automne normales pour la région.

Vous trouverez aux tableaux 3 à 8 les débits d'air recommandés selon des conditions variées.

3.7 *Facteurs favorables au séchage* Plusieurs facteurs peuvent influer sur l'efficacité du séchage du grain.

D'abord, la concentration d'impuretés et de grains brisés peut réduire considérablement l'effet du débit d'air. Il importe d'atténuer le problème en retirant une certaine quantité de grains dans le centre de la zone de déchargement après le remplissage de la cellule. Vous pouvez utiliser à la place un épandeur de grains. Le nivelage manuel du grain peut aussi favoriser un passage uniforme de l'air dans la cellule.

Commencer la ventilation dès qu'il y a assez de grains sur les surfaces perforées de sorte que le grain ne s'envole pas. Continuer la ventilation jusqu'à ce que le grain soit sec ou assez refroidi pour éviter qu'il ne s'endommage.

Durant l'entreposage, vérifier la température et le degré d'humidité du grain à au moins un mètre de profondeur dans la partie supérieure de la cellule.

En hiver, faire fonctionner le ventilateur pendant 6 à 8 h si la température ambiante s'élève ou après des périodes durant lesquelles la température ambiante dépasse 0 °C.

Enfin, utiliser le ventilateur au printemps pour réchauffer le grain à 10 °C, surtout lorsque vous prévoyez le garder en entrepôt après la fin juin.

Tableau 3 Débit d'air minimum recommandé au Manitoba pour une cellule d'entreposage avec un plancher tout perforé et une surface de grains plane

Culture et date de récolte	Date de séchage	Taux de séchage à l'automne	Taux d'humidité (%)								
			16	17	18	19	20	22	24	26	28
			Débit d'air (L/s·m³)								
Blé en graines											
15 août	Automne	100	9	9	10	15	27	**	—	—	—
		97	6	7	10*	15	27	**	—	—	—
		94	6	6	10*	15*	27*	**	—	—	—
		90	5	5	10*	15*	27*	**	—	—	—
	Printemps		6	7	10	15	27	**	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		97	97	100	100	100	**	—	—	—
1 septembre	Automne	100	10	11	12	13	17	40	—	—	—
		97	8	10	10	13*	17	40	—	—	—
		94	7	9	10	13*	17	40*	—	—	—
		90	7	8	9	13*	17	40*	—	—	—
	Printemps		7	8	8	13	17	40	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		94	91	88	100	100	100	—	—	—
15 septembre	Automne	100	19	23	28	30	32	37	—	—	—
		97	17	22	23	24	25	27	—	—	—
		94	13	13	16	17	20	27	—	—	—
		90	10	12	15	16	17	26	—	—	—
	Printemps		8	8	8	8	14	26	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		76	73	52	33	82	88	—	—	—
1 octobre	Printemps		8	8	8	9	13	23	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		33	15	3	3	39	61	—	—	—
15 octobre	Printemps		8	8	8	11	15	24	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		0	0	0	3	9	30	—	—	—
Blé commercial											
15 août	Automne	100	9	9	10	10	17	34	—	—	—
		97	6	7	8	9	17*	34*	—	—	—
		94	5	6	7	9*	17*	34*	—	—	—
		90	5	5	6	9*	17*	34*	—	—	—
	Printemps		6	6	7	9	17	34	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		97	94	94	97	100	100	—	—	—

(à suivre)

Tableau 3 Débit d'air minimum recommandé au Manitoba pour une cellule d'entreposage avec un plancher tout perforé et une surface de grains plane (*suite*)

Culture et date de récolte	Date de séchage	Taux de séchage à l'automne	Taux d'humidité (%)								
			16	17	18	19	20	22	24	26	28
			Débit d'air (L/s·m³)								
1er septembre	Automne	100	10	11	12	13	15	21	—	—	—
		97	8	10	10	12	13	21	—	—	—
		94	7	9	10	11	13*	21	—	—	—
		90	7	8	9	10	13*	21*	—	—	—
	Printemps		7	8	8	8	13	21	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		94	91	88	76	97	100	—	—	—
15 septembre	Automne	100	19	23	28	30	32	37	—	—	—
		97	17	22	23	24	25	27	—	—	—
		94	13	13	16	17	20	27	—	—	—
		90	10	12	15	16	17	26	—	—	—
	Printemps		8	8	8	8	9	18	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		76	73	52	33	15	88	—	—	—
1er octobre	Printemps		8	8	8	8	8	15	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		33	15	3	3	0	48	—	—	—
15 octobre	Printemps		8	8	8	8	8	16	—	—	—
	% de temps du séchage en automne		3	0	0	0	0	0	—	—	—
Orge											
15 août	Automne	100	16	—	16	—	18	40	—	—	—
		97	9	—	12	—	18*	40*	—	—	—
		94	8	—	10	—	18*	40*	—	—	—
		90	7	—	9	—	18*	40*	—	—	—
	Printemps		7	—	9	—	18	40	—	—	—
	% du temps de séchage à l'automne		88	—	88	—	100	100	—	—	—
1er septembre	Automne	100	19	—	19	—	24	30	—	—	—
		97	16	—	19	—	19	27	—	—	—
		94	14	—	17	—	18	27	—	—	—
		90	13	—	16	—	17	27*	—	—	—
	Printemps		13	—	13	—	13	27	—	—	—
	% du temps de séchage à l'automne		91	—	85	—	85	97	—	—	—

(à suivre)

Tableau 3 Débit d'air minimum recommandé au Manitoba pour une cellule d'entreposage avec un plancher tout perforé et une surface de grains plane (*fin*)

Culture et date de récolte	Date de séchage	Taux de séchage à l'automne	Taux d'humidité (%)								
			16	17	18	19	20	22	24	26	28
			Débit d'air (L/s·m³)								
15 septembre	Automne	100	35	—	45	—	50	**	—	—	—
		97	29	—	39	—	45	47	—	—	—
		94	24	—	30	—	31	37	—	—	—
		90	20	—	25	—	30	35	—	—	—
	Printemps		13	—	13	—	13	17	—	—	—
	% du temps de séchage à l'automne		73	—	64	—	45	55	—	—	—
1 octobre	Printemps		13	—	13	—	13	17	—	—	—
	% du temps de séchage à l'automne		45	—	24	—	6	15	—	—	—
Maïs†											
15 septembre			—	—	—	—	10	—	29	—	117
1er octobre			—	—	—	—	8	—	22	—	49
15 octobre			—	—	—	—	8	13	20	25	52
1er novembre			—	—	—	—	8	—	12	—	20

Référence : Agriculture Canada (1986).
* Des débits d'air moins élevés sont possibles dans ce cas, mais il y aura alors des risques de dommages. Voir votre ingénieur agricole local pour plus de détails.
** Les débits d'air seraient excessifs pour ce cas.
† Selon des simulations par ordinateur avec les données atmosphériques de Winnipeg pour les années 1961 à 1970. Le degré d'humidité final s'élevait à 15,5 %. Les débits d'air indiqués termineraient le séchage au printemps suivant l'année de la récolte.

3.8 *Exposé général* Les systèmes de séchage à l'air naturel offrent d'habitude un débit d'air de 10 à 30 (L/s) par mètre cube de grains. Ce débit suffit à sécher le grain gourd ou du moins à permettre de le garder en entrepôt pour l'hiver. Il peut même convenir pour du grain humide. Toutefois, un tel système de séchage nécessite les soins d'un exploitant expérimenté.

Les systèmes de séchage à l'air naturel requièrent un investissement de capitaux inférieur et moins de matériel de manutention que les séchoirs à air chaud. Ces systèmes consomment aussi moins d'énergie électrique que tous les autres systèmes de séchage, surtout dans les régions qui profitent d'une basse humidité relative en automne et où il ne faut retirer du grain qu'un faible degré d'humidité.

En fait, les systèmes de séchage à l'air naturel fonctionnent très bien dans les régions ayant une faible humidité relative en automne. Dans de telles régions, il importe cependant de faire attention aux dommages causés par un surséchage du grain, car ils peuvent être considérables.

Dans les régions où l'humidité relative s'approche de l'équilibre du degré d'humidité pour le grain sec, les coûts d'énergie électrique augmentent rapidement. Il faut alors un fort débit d'air afin de prévenir la formation d'impuretés et augmenter le temps d'utilisation des ventilateurs pour enlever l'humidité.

Dans la conception d'un système de séchage à l'air naturel, il faut prévoir des cellules larges et peu profondes. Afin de réaliser des économies, choisir un ventilateur qui maintient la plus basse pression statique possible. De tels ventilateurs sont surtout nécessaires dans les entrepôts de récoltes de petits grains (comme le lin et le colza Canola) parce que la perte de pression dans le grain augmente considérablement en fonction de la

Tableau 4 Débit d'air recommandé pour le séchage du blé à l'air naturel à Edmonton, Alberta

Date de récolte	Année	Taux d'humidité initial (%)				
		16	18	20	22	24
		Débit d'air (L/s·m³)				
15 août	2e plus mauvaise	—	5,0	20,0	35,0	—
	la plus mauvaise	—	6,3	22,5	41,3	—
1er septembre	2e plus mauvaise	—	4,4	12,5	28,8	—
	la plus mauvaise	—	4,4	16,3	28,8	—
15 septembre	2e plus mauvaise	2,5	3,8	7,5	17,5	40,0
	la plus mauvaise	2,5	4,4	7,5	18,8	41,3
1er octobre	2e plus mauvaise	—	3,8	6,3	10,0	—
	la plus mauvaise	—	4,4	6,3	11,3	—
15 octobre	2e plus mauvaise	—	3,8	5,6	8,8	—
	la plus mauvaise	—	4,4	5,6	8,8	—

Les données dans ce tableau sont fondées sur des résultats de simulation du séchage pour les années 1967 à 1976.

Tableau 5 Débit d'air recommandé pour le séchage du blé à l'air naturel à Swift Current, Saskatchewan

Date de récolte	Année	Taux d'humidité initial (%)				
		16	18	20	22	24
		Débit d'air (L/s·m³)				
15 août	2e plus mauvaise	—	5,0	13,8	26,3	—
	la plus mauvaise	—	5,0	15,0	35,0	—
1er septembre	2e plus mauvaise	—	5,0	11,3	21,3	—
	la plus mauvaise	—	5,6	12,5	25,0	—
15 septembre	2e plus mauvaise	2,5	3,8	8,8	17,5	33,8
	la plus mauvaise	3,1	4,4	11,3	18,8	35,0
1er octobre	2e plus mauvaise	—	3,8	7,5	12,5	—
	la plus mauvaise	—	4,4	7,5	15,0	—
15 octobre	2e plus mauvaise	—	3,8	6,3	10,0	—
	la plus mauvaise	—	4,4	6,3	11,3	—

Les données dans ce tableau sont fondées sur des résultats de simulations du séchage pour les années 1960 à 1974.

Tableau 6 Débit d'air recommandé pour le séchage du blé à l'air naturel à London, Ontario

Date de récolte	Année	Taux d'humidité initial (%)				
		20	22	24	26	28
		Débit d'air (L/s·m³)				
15 septembre	2e plus mauvaise	21,0	35,0	69,0	113,0	175,0
	la plus mauvaise	26,8	51,3	72,3	128,0	187,0
1er octobre	2e plus mauvaise	11,7	25,6	49,0	87,5	111,0
	la plus mauvaise	15,2	30,3	66,5	128,0	163,0
15 septembre	2e plus mauvaise	7,7	17,5	39,6	70,0	140,0
	la plus mauvaise	11,7	24,5	73,5	128,0	152,0
1er novembre	2e plus mauvaise	8,2	12,8	21,0	40,8	67,5
	la plus mauvaise	9,3	12,8	23,3	42,0	80,5
15 novembre	2e plus mauvaise	8,2	7,7	15,2	22,1	39,6
	la plus mauvaise	8,2	7,7	16,3	26,8	45,5

Les données dans ce tableau sont fondées sur des résultats de simulations du séchage pour les années 1962 à 1973.

Tableau 7 Débit d'air minimum prévu pour le séchage du colza Canola au Manitoba

Date de récolte	Date de séchage	Taux de séchage à l'automne	Taux d'humidité initial (%)					
			10	11	12	13	14	15
			Débit d'air (L/s·m³)					
15 août	Automne	100	16	16	16	16	17	28
		97	13	13	13	13	15	28*
		94	10	10	11	13*	15*	28*
		90	7	8	9	13*	15*	28*
	Printemps		7	7	7	13	15	28
	% du temps de séchage à l'automne		88	85	76	97	97	100
1er septembre	Automne	100	26	26	26	27	27	30
		97	19	19	19	19	19	20
		94	13	17	17	17	17	20*
		90	13	14	15	16	17	20*
	Printemps		12	12	12	12	16	20
	% du temps de séchage à l'automne		85	82	79	70	85	97
15 septembre	Printemps		12	12	12	12	12	14
	% du temps de séchage à l'automne		55	39	39	33	30	36
1er octobre	Printemps		12	12	12	12	12	12
	% du temps de séchage à l'automne		24	24	15	15	9	6

* Des débits d'air moins élevés sont possibles dans ce cas, mais il y aura alors des risques de dommage. Voir votre ingénieur agricole local pour plus de détails.

Tableau 8 Effet de la date de récolte du maïs et du degré d'humidité initial sur le débit d'air pour le séchage à basse température du maïs à Toronto

Date de récolte **	Condition climatique (année)				
	1971 (pauvre)	1972	1975	1969	1976 (bonne)
	Débit d'air ($L/s \cdot m^3$)				
1er octobre	28,1	23,9	23,5	21,2	12,8
15 octobre	26,1	23,8	21,5	16,4	12,4
1er novembre	18,7	20,8	20,0	19,7	13,1
15 novembre	24,4	27,2	26,6	18,3	12,7
Taux d'humidité initial (%)†					
22	26,1	23,8	21,5	16,5	12,4
24	42,3*	25,3	28,1	21,8	18,9
26	46,1*	29,8	47,4*	28,9	21,2

* De tels débits d'air peuvent ne pas être possibles à moins d'utiliser un ventilateur centrifuge à haute vitesse ou que le grain soit peu profond.
** Degré d'humidité initial de 22 %.
† Date de récolte le 15 octobre.

Référence : Mittal and Otten (1982).

profondeur du grain et de la vélocité de l'air. Ce choix de cellule et de ventilateur réduit le coût marginal par cellule, mais augmente toutefois celui du plancher perforé et des fondations.

3.9 Séchage à l'air chaud

Au fur et à mesure que le grain sèche, il libère de l'humidité dans l'air à un taux variant selon deux facteurs : la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau (DPV), entre les grains et l'air, et la perméabilité des grains. Une DPV excessive endommage les grains.

Durant la phase initiale du séchage, le grain est encore assez frais et il se réchauffe lentement en raison d'une faible conductivité thermique.

Au fur et à mesure que le grain sèche, l'humidité à la surface ou près de la surface des grains s'évapore, ce qui contrôle davantage le taux de réchauffement parce que les grains perdent de la chaleur par évaporation. Quand le grain est presque sec, l'humidité près de la surface diminue de sorte que le taux d'enlèvement de l'humidité du centre des grains à travers l'écale détermine le taux de séchage ultérieur possible. La perméabilité du grain et la DPV influent sur la façon dont l'humidité se déplace dans les grains. Un enlèvement rapide de l'humidité à la surface du grain entraîne un surséchage des couches externes.

Lorsque le grain est séché à haute température, il faut s'attendre à un surséchage. Des températures excessivement hautes et un séchage accéléré peuvent causer deux problèmes complexes :

- des écales friables avec une perméabilité à l'humidité plus basse que la normale
- une pression de vapeur élevée à l'intérieur des grains.

Ces deux problèmes combinés entraînent un craquement critique des écales des grains. Ils peuvent aussi augmenter les dommages causés au grain durant la manutention.

Le grain gourd sèche normalement avant que la température du grain et la pression de vapeur interne atteignent les niveaux susceptibles de causer un craquement critique. Par contre, le grain humide ou mouillé est très sensible au taux de séchage. Pour du grain mouillé, choisir

un séchoir ou un système qui effectue un séchage lent, surtout durant les dernières étapes du séchage. Un tel système réduit de façon considérable les dommages causés aux grains en plus de limiter les détériorations qui peuvent survenir durant la manutention.

Un enlèvement rapide de l'humidité durant les dernières étapes de séchage nécessite une grande énergie électrique. Deux facteurs causent cette demande plus forte d'énergie électrique. D'abord, au lieu de sécher le grain, l'énergie électrique augmente la chaleur sensible du grain. Ensuite, la libération plus lente de l'humidité du grain presque sec entraîne une sortie d'air ayant une basse humidité relative. Cela a pour effet de réduire l'efficacité du séchage.

Une température du grain trop élevée réduit la capacité des grains à germer. Le temps de séchage et la température du grain sont corrélatifs; toutefois, le court temps requis pour le séchage à l'air chaud réduit généralement les effets sur la qualité du grain.

Des températures extrêmement élevées peuvent entraîner une décoloration et une déformation des grains. Il est possible de prévenir ces problèmes en utilisant des températures supérieures à celles nécessaires pour un séchage complet. Cependant, il s'agit d'une mesure peu souhaitable.

Voir les températures recommandées au tableau 9 pour plus de sécurité. Il est très important de tenir compte des températures qui ne présentent pas de risques pour la planification des systèmes de séchage du grain.

La conception et le fonctionnement des séchoirs à grains varient. Ils offrent un grand éventail de conditions diverses qui influent sur la température de séchage sûre. Deux aspects de la conception du séchoir influent plus particulièrement sur la température sûre :

- une température uniforme de l'air distribué
- un degré d'humidité uniforme du grain à sécher.

La conception du système de distribution de l'air, le type de brûleur, la forme de la chambre d'air et le mode de fonctionnement sont tous des facteurs qui influent sur la température de l'air distribué aux divers endroits dans le séchoir à grains. Les variations de température dans un séchoir demeurent généralement constantes pour chaque type de grains, mais changent considérablement d'un type de grains à l'autre en raison des différences dans le débit d'air.

Pour le grain dont le degré d'humidité n'est pas uniforme, la température maximale à laquelle on peut exposer les grains les plus secs sans les endommager est la température sûre pour ce lot. La température sûre pour un séchoir avec recirculation de l'air est plus basse que celle d'un séchoir statique parce que l'air le plus chaud et le plus sec touche continuellement les mêmes grains en premier durant tout le processus de séchage. Ces grains deviennent donc trop secs lorsque toute la masse de grains sera séchée.

Les températures recommandées au tableau 9 sont exactes si l'on ne sèche pas le grain à plus de 1 % au-dessus du pourcentage de grain (tel qu'indiqué au tableau 2) et si l'on n'enlève pas plus que 6 % de l'humidité dans un passage au séchoir à haute vitesse. Pour enlever plus que 6 % d'humidité au premier passage, la température de séchage initiale peut dépasser les températures recommandées au tableau 9 parce que l'évaporation refroidit le grain durant cette étape du séchage. Toutefois, quand le grain est presque sec, il faut maintenir la température de l'air aux niveaux recommandés au tableau 9.

Faire fonctionner les séchoirs statiques de 5 à 10 °C en dessous des températures recommandées pour les utilisations commerciales, surtout lorsque vous séchez des graines oléagineuses. Une exposition prolongée à de hautes températures nuit à la qualité de l'huile dans les graines oléagineuses.

Pour le grain humide (tableau 2), on peut utiliser sans risque des températures d'air de 20 °C au-dessus de celles recommandées (tableau 9) dans les premières étapes du séchage.

3.10 *Types de séchoirs* Il existe trois principaux types de séchoirs à air chaud :

- les séchoirs statiques dans lesquels le grain ne bouge pas durant le séchage et est ensuite déchargé
- les séchoirs avec recirculation dans lesquels le grain est constamment mélangé durant le séchage

Tableau 9 Températures de séchage maximales

Culture	Température maximale (°C)		
	Grain ou malt	Utilisation commerciale	Fourrage
Blé	60	65	80–100
Avoine	50	60	80–100
Orge	45	55	80–100
Seigle	45	60	80–100
Maïs	45	60	90–100
Lin	45	80	80–100
Colza Canola	45	65	—
Pois	45	70	80–100
Moutarde	45	60	—
Tournesol	45	50	—
Sarrasin	45	45	—

- les séchoirs à débit continu dans lesquels le grain humide entre dans le séchoir et le grain sec en ressort de façon continue.

Chacun de ces séchoirs peut s'ajouter à des cellules rondes en métal ou exister de façon autonome. Il importe de choisir un séchoir qui permet de sécher en 24 h seulement la quantité de grains normalement récoltée dans une journée.

3.11 *Séchoirs statiques* Le grain humide est chargé dans le séchoir statique et l'air chaud passe à travers le grain jusqu'à ce que le degré d'humidité moyen atteigne le niveau voulu pour le séchage. Le grain est ensuite refroidi et déchargé. La figure 6 représente une coupe d'un séchoir statique sans recirculation.

Vu que le grain ne bouge pas durant le séchage, le grain le plus près de la chambre à air chaud sèche avant le reste du grain. Pour sécher la masse de grains, il faut sursécher beaucoup le grain interne. Afin d'éviter d'endommager le grain, réduire la température du séchoir pendant les dernières étapes du séchage.

3.12 *Séchoirs statiques pour cellules* Ce type de séchoir (fig. 7) comprend un plancher perforé, un ou plusieurs ventilateurs et brûleurs, en plus des dispositifs de réglage de la température. On y ajoute aussi souvent des compte-minutes afin d'aider à régler la température, un manomètre afin d'établir la corrélation entre la profondeur du grain et la capacité du ventilateur ainsi qu'un épandeur de grains afin de bien niveler le grain et d'obtenir une distribution plus uniforme du matériel fin ou des impuretés.

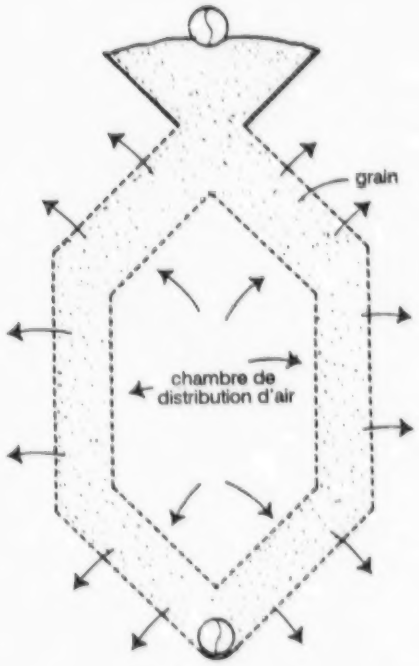


Fig. 6. Séchoir statique sans recirculation.

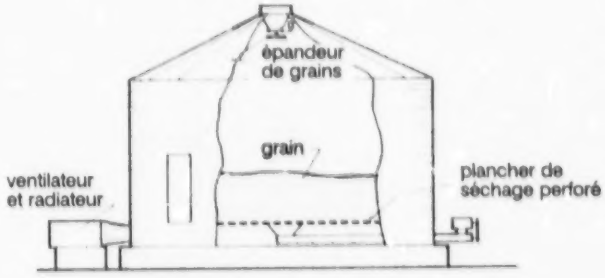


Fig. 7. Séchoir statique dans la cellule.

De plus, des cellules d'entreposage temporaire pour le grain humide et sec réduisent le temps et le matériel supplémentaire requis pour charger et décharger le séchoir. Un deuxième séchoir utilisant le même dispositif de séchage et de ventilation que le premier séchoir peut être utilisé comme une cellule d'entreposage temporaire du grain mouillé. Un déflecteur d'air peut répartir l'air chaud entre les deux cellules.

Le débit d'air utilisé dans les séchoirs varie beaucoup. Toutefois, la plupart des systèmes offrent un débit de 125 (L/s) par mètre cube

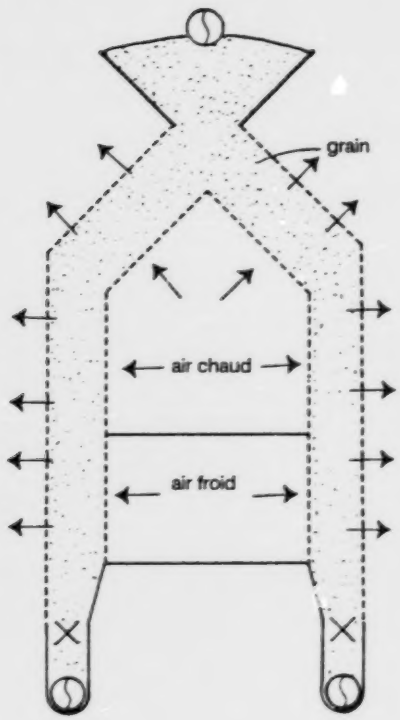


Fig. 11. Séchoir portatif à débit croisé continu.

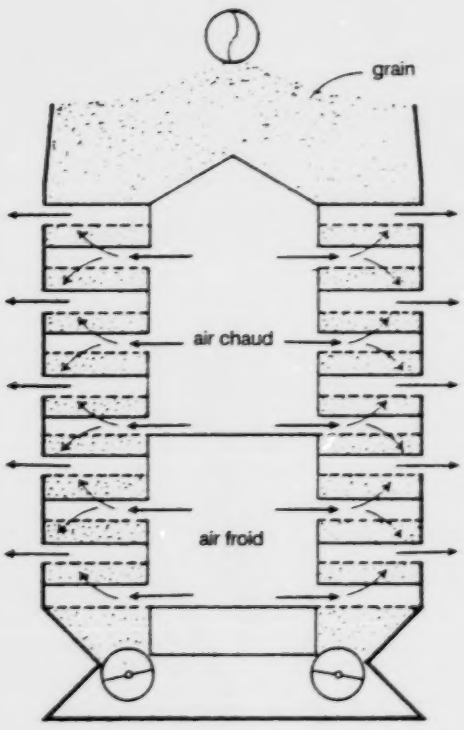


Fig. 12. Séchoir portatif à débit parallèle continu.

Les séchoirs à tablettes n'utilisent pas de grillages, alors on peut s'en servir tant pour les gros grains que les petits.

3.16 Systèmes de réglage de la température

Pour tous les séchoirs, la température de l'air varie d'un endroit à l'autre de la chambre d'air chaud. Cet endroit varie pour chaque type de grains en raison de la résistance au débit d'air des différentes espèces de grains. Afin de prévenir un séchage excessif, il importe de mesurer la température à plusieurs endroits dans la chambre à air chaud pendant le premier essai de l'équipement pour chaque espèce de grains. Cela permet à l'exploitant de placer le lecteur de température dans la zone la plus chaude ou de recalibrer le lecteur de façon à pouvoir établir une corrélation avec les plus hautes températures qui existent dans les autres zones selon ce qu'on sait.

Si on accepte des compromis dans la conception du séchoir portatif soit pour en préserver le caractère soit pour réaliser des économies, cela peut avoir des conséquences sur l'uniformité de la température de l'air qui sèche le grain. Parmi ces compromis, on trouve la taille et la conception du brûleur, l'aménagement de l'installation, la possibilité de mélanger l'air avant l'entrée dans la chambre à air chaud ainsi que la température et la pression du gaz qui approvisionnent le brûleur.

Dans une certaine mesure, pour la conception d'un grand nombre de séchoirs commerciaux sur le marché, on n'a pas tenu compte des principes du mouvement des fluides qui régissent l'usage des transitions entre les sorties du ventilateur et les grands conduits. Dans la plupart des séchoirs, le dispositif de combustion se trouve à l'entrée de la chambre à air chaud. Ainsi, l'air chauffé ne peut pas se mélanger convenablement avant de se répartir dans la chambre. Il importe donc de choisir des brûleurs de façon à obtenir une combustion complète du gaz le plus près possible du brûleur. Idéalement, on devrait choisir des brûleurs qui produisent une combustion complète à l'intérieur d'environ un mètre du brûleur qui fonctionne à pleine capacité. Ce système favorise le mélange de l'air.

Des vélocités de 15 m/s dans le conduit permettent une sortie maximale d'air chauffé par le brûleur. La capacité du brûleur augmente avec de hautes vélocités dans le conduit en raison des plus fortes turbulences. Dans certains modèles de séchoirs, on peut régler les vélocités dans le conduit de façon à optimiser le rendement du brûleur à plein feu. Toutefois, l'air en se déplaçant très vite passe directement dans la chambre beaucoup plus

grande du séchoir, ce qui rend impossible de maintenir une température et un débit d'air uniformes dans tout le séchoir. Réduire la température et mélanger le grain séché compense les problèmes causés par les lacunes dans la conception.

En général, les exploitants règlent les températures des séchoirs en ajustant à la main les valves de modulation qui règlent le débit gazeux lequel approvisionne le brûleur. Le réglage des valves diffère selon les espèces de grains puisque le débit d'air requis varie également. Toutefois, des valves motorisées pour un ajustement automatique peuvent éliminer ce long travail manuel d'essais par tâtonnements. Les dispositifs de valves motorisées sont peu chers et vous feront épargner beaucoup de temps. Ils offrent aussi un contrôle plus sûr que les dispositifs manuels. Par exemple, les valves motorisées tiennent automatiquement compte des variations normales de la température ambiante durant le jour et des variations de pression dans le réservoir des séchoirs à propane.

La qualité du gaz qui arrive aux valves de modulation varie en fonction du rendement du vaporisateur utilisé. Un vaporisateur placé à l'intérieur de la chambre du séchoir ne peut compenser les effets des fluctuations dans les conditions ambiantes. Le vaporisateur transfère seulement la chaleur au gaz afin de lui permettre de se vaporiser avant d'atteindre le brûleur.

Il importe de choisir un vaporisateur ajustable afin de tenir compte des besoins très variables du séchoir concernant les transferts d'énergie. Par exemple, diverses espèces de grains nécessitent des températures différentes pour le séchage. Aussi, les fluctuations dans les conditions ambiantes et les pressions dans le réservoir nécessitent des ajustements dans le fonctionnement du vaporisateur.

L'installation d'une valve de modulation motorisée, avec un vaporisateur interne, ou d'un modulateur manuel avec un vaporisateur externe offre de meilleures possibilités de régler la température pour la plupart des séchoirs. Toutefois, un vaporisateur externe avec un régulateur spécial de la température et de la pression du gaz de sortie allié à une valve de modulation motorisée fournit le meilleur contrôle possible de la température.

Il faut installer un tuyau d'approvisionnement en gaz de la bonne taille afin de permettre la sortie de chaleur nécessaire du brûleur. Des pièces de contrôle plus petites sont moins chères et paraissent donc avantageuses. Toutefois, l'exploitation du système par temps froid vous permettra rapidement de constater une sortie insuffisante de chaleur du brûleur et un volume efficace du réservoir diminué dans les unités trop petites.

3.17 Lecture de la température

La plupart des séchoirs à un brûleur utilisent trois types de lecteurs de température :

- les lecteurs de température du grain
- les détecteurs de limite minimale qui ferment le gaz lorsque la flamme s'éteint
- les lecteurs dans la chambre d'air (section 3.16).

Le lecteur de température du grain, placé d'habitude dans le grain près de l'extérieur de la colonne, mesure la température du grain de façon que l'exploitant puisse évaluer le degré d'humidité. Dans les séchoirs statiques, ce lecteur met automatiquement fin au séchage et fait commencer le cycle de refroidissement ou de déchargement. Dans certains séchoirs statiques, ces lecteurs remplacent les compteurs qui remplissent les mêmes fonctions. Dans les séchoirs à débit continu, les lecteurs de température règlent le déchargement des transporteurs.

En raison de son emplacement, le lecteur de température du grain mesure la température de l'air qui passe en plus de celle du grain. Il peut aussi enregistrer la chaleur du soleil ou le froid causé par le vent, selon son emplacement. Bien que les effets directs du soleil et du vent soient négligeables sur la variation réelle du rendement d'un séchoir à air chaud, ces conditions atmosphériques peuvent nuire gravement au rendement du système de contrôle. Pour une exploitation constante, il importe de protéger les lecteurs de température à la fois du soleil et du vent.

On trouve d'autres dispositifs électroniques qui enregistrent la température du grain, mais ceux qui les ont utilisés signalent des variations. Par conséquent, en attendant une amélioration de ces techniques nouvelles, il faut faire preuve de discernement dans l'utilisation de tels lecteurs.

Vérifier et calibrer les lecteurs une fois l'an, étant donné que le rendement efficace du séchoir repose sur une lecture exacte de la température. Il faut installer les lecteurs aux endroits appropriés. Le meilleur endroit varie selon le genre de séchoir et le type de récolte. Les lecteurs de température peuvent être fragiles, alors il faut les placer dans un endroit où ils ne seront pas endommagés.

Vérifier et régler le séchoir en vous fondant sur l'humidité et la température mesurées dans les échantillons de grains prélevés dans le séchoir.

D'habitude, les lecteurs du degré d'humidité ne permettent pas de mesurer avec exactitude l'humidité du grain qu'on vient de sécher. Alors, il faut prévoir une réhumidification de 0 à 2 % selon le taux de séchage et le degré d'humidité initial du grain, soit de 0 à 2 %. La réhumidification reflète le degré d'humidité moyen dans les grains après le déchargement du séchoir. Vérifier de près les changements pour chaque condition afin d'éviter un surséchage ou un sous-séchage.

3.18 Prévention des incendies

Un incendie peut se produire durant le séchage de toute récolte dans un séchoir utilisant un brûleur à feu direct. Des températures trop élevées dans la chambre à air chaud peuvent causer un incendie. Toutefois, la plupart des incendies sont causés parce que des matériaux combustibles, comme des impûretés, de la poussière et des brins de paille, peuvent s'accumuler près du brûleur. Le brûleur enflamme ces matériaux lorsqu'ils passent dans les colonnes de grains. Afin de prévenir les incendies, empêcher l'accès de matériaux combustibles transportés par l'air dans le ventilateur d'approvisionnement en air.

Les graines oléagineuses présentent des risques d'incendie parce qu'elles ont tendance à enduire les surfaces internes des séchoirs à grains d'un résidu combustible qui, s'il s'enflamme, brûle rapidement. Il est donc très important de nettoyer chaque jour tout séchoir utilisé pour sécher des graines oléagineuses.

On peut aussi prévenir les incendies en tenant compte du vent dominant pour l'orientation du séchoir, en utilisant un matériel de filtration à gros grains ou un large filtre afin d'éviter de nuire considérablement au passage de l'air et en ayant recours à un nouveau conduit d'entrée afin d'éloigner l'entrée de tout matériel dangereux. Aussi, avant le séchage, il importe de nettoyer le grain de façon à enlever le matériel fin susceptible de s'enflammer. De tels moyens de prévention ont été utilisés avec succès, mais leur efficacité variait selon les circonstances.

La vérification du séchoir permet d'assurer l'uniformité du passage du grain, du débit d'air et de la température et aide aussi à réduire les risques d'incendie. Il faut surtout faire attention à ces facteurs pour le séchage des graines de tournesol.

Les graines de tournesol et de colza sèchent bien à l'air naturel. Profiter d'une chaude température d'automne pour le séchage de ces grains. Passer les grains dans le séchoir sans allumer le brûleur. En plus de prévenir un incendie, cette méthode permet également d'épargner du combustible et de prolonger la durée de vie du séchoir.

Pour les autres récoltes susceptibles de s'enflammer durant le séchage, le seul moyen de prévention des incendies consiste à surveiller de près le fonctionnement du séchoir.

Si un incendie éclate, fermer l'entrée d'air. Cela peut étouffer l'incendie s'il n'est pas trop tard. Sinon, vaporiser de l'eau ou un produit chimique pour l'extinction du feu. Garder près du séchoir le matériel de lutte contre les incendies.

3.19 Sources d'énergie pour les séchoirs

Fondamentalement, on peut utiliser toute substance combustible ou source d'énergie pour sécher le grain. Toutefois, dans la plupart des cas, les seules sources d'énergie pratiques au Canada sont le gaz naturel, le propane et l'électricité.

Si vous utilisez un carburant non gazeux, la création de sous-produits de la combustion nécessite qu'un échangeur de chaleur soit installé entre la chambre de combustion et l'entrée d'air. Cela réduit l'efficacité du carburant et fait augmenter le coût d'installation du séchoir.

Vous trouverez au tableau 10 une comparaison entre la consommation relative de carburant et les capacités du séchoir selon diverses

Tableau 10 Conséquences sur la consommation de combustible et la capacité du séchoir pour diverses méthodes de séchage du maïs en réduisant de 25 à 15 % le taux d'humidité

Méthode	Propane par tonne de maïs à 5 °C (L)	Électricité par tonne (kWh)	Capacité relative du séchoir
Séchage à l'air chaud	30	4,0	1,0
Refroidissement dans la cellule	26	3,2	1,35
Refroidissement lent différé	22	2,8	1,6
Refroidissement et séchage dans la cellule	12	28,0	3,0

Référence : Cloud et Morey (ouvrage non publié).

méthodes de séchage du maïs. Il est à remarquer que le séchage à une température élevée nécessite une énorme quantité d'énergie. C'est pourquoi on utilise seulement l'électricité pour un séchage à basse température. Le coût d'installation de l'électricité dans les bâtiments agricoles et les frais imposés par les compagnies d'électricité pour une demande de grand courant électrique limitent également l'utilisation de l'électricité.

3.20 Séchage à basse température

Le séchage à basse température consiste à réchauffer légèrement l'air qui passe dans le grain. Normalement, le grain se trouve dans une cellule dont toute la surface du plancher est perforée.

L'installation d'un moteur à entraînement par le ventilateur dans le trajet de l'air permet d'augmenter la température de 1 à 4 °C devant le ventilateur. Une autre solution possible consiste à installer un brûleur à gaz ou un radiateur électrique dans l'entrée d'air afin d'augmenter davantage la température et d'accélérer le séchage. La deuxième solution est préférable dans les régions où l'humidité relative moyenne en automne dépasse 75 %. Toutefois, dans la plupart des régions, l'ajout d'une petite quantité de chaleur de cette façon est moins efficace qu'un séchage à haute température (Mittal et Otten, 1982).

Comme on l'a expliqué à la section 3.4, le plus grand taux d'endommagement du grain causé par de faibles augmentations de la température dépasse une hausse du taux de séchage. Par conséquent, l'ajout d'une source de chaleur complémentaire nécessite une hausse du débit d'air afin d'accélérer davantage le taux de séchage. Le séchage à l'air naturel consomme moins d'énergie que celui à basse température dans les endroits où l'équilibre de l'humidité relative de l'air en contact avec le grain à sécher dépasse l'humidité relative moyenne.

Un séchage à basse température entraîne deux coûts importants :

- le coût de l'énergie
- le coût du surséchage du grain.

Le séchage à basse température consomme plus d'énergie que le séchage à l'air naturel dans les endroits où la deuxième méthode est efficace. Pour un meilleur rendement par rapport au coût, augmenter le débit d'air afin d'accélérer le séchage plutôt que d'ajouter une source de chaleur complémentaire. L'augmentation du débit d'air permet aussi de réduire les risques de dommages aux grains entreposés et augmente les chances de conserver le grain gourd durant l'hiver pour un séchage final au printemps.

Le coût du surséchage du grain se traduit par une perte de matériel vendable.

3.21 Utilisation de diverses méthodes de séchage

Il s'agit de toutes les méthodes utilisées entre la récolte d'un grain gourd et humide jusqu'à la production d'un grain sec et refroidi qui peut être entreposé sans danger.

Le choix des diverses méthodes de séchage pour une exploitation donnée varie selon l'espace disponible, le coût de chaque méthode, les récoltes à traiter et leurs volumes ainsi que les conditions atmosphériques dans la région.

Le conditionnement du grain dans le champ est la méthode de séchage la plus répandue pour la plupart des espèces de grains dans l'Ouest canadien où les conditions atmosphériques permettent habituellement un séchage rapide du grain avant la récolte. Mais cette méthode est coûteuse, les années où l'on connaît un temps inhabituellement humide. Ces années-là, il y a une importante réduction de la qualité du grain de même qu'une perte du poids causée par la réhumidification du grain ou par un séchage insuffisant. Des recherches sur l'utilisation de dessiccatifs afin d'accélérer le séchage dans le champ ont donné des premiers résultats encourageants.

Les exploitants agricoles dans l'est du Canada utilisent des séchoirs pour un grand nombre de récoltes comme le maïs, les haricots et les graines de tournesol. Les séchoirs servent aussi à l'occasion au séchage des récoltes de petits grains.

Il importe que tous les systèmes de manutention puissent s'adapter à un grain humide récolté au champ. Une méthode de manutention du grain humide consiste simplement à utiliser un appareil pour tourner ou mélanger le grain à l'entreposage. Toutefois, si toute la masse de grains est humide ou qu'on prévoit une longue période d'entreposage, tourner le grain représente seulement une solution à court terme.

Les exploitations agricoles doivent au moins avoir un système pour faire passer l'air à travers un bon volume de grain afin de prévenir les dommages. Selon les conditions atmosphériques et les cultures, le système de ventilation peut aussi fournir les installations de séchage nécessaires.

Dans d'autres cas, il faut s'équiper de séchoirs à haute température et se poser certaines questions sur la meilleure utilisation possible du système de séchage. Pour répondre à de

telles questions, il importe de prendre en considération les points suivants.

- Un grain sec et refroidi présente des conditions d'entreposage relativement sûres.
- Les coûts d'énergie et les risques de causer des dommages aux grains sont plus élevés quand on utilise un séchoir à haute température pour réduire à son plus bas le taux d'humidité d'un grain qui était au départ humide.
- Lorsque le grain est séché partiellement avant de le mettre dans un séchoir à haute température, on obtient de plus hautes températures, une plus grande économie d'énergie et le séchoir peut contenir plus de grain.
- Un séchoir à haute température atteint sa capacité de séchage maximale si l'on ne l'utilise pas à la fois pour sécher le grain et le refroidir. Il est préférable d'ajouter un brûleur qui ne fonctionne que pour le refroidissement ou encore, si l'on a des séchoirs statiques, d'éliminer le cycle de refroidissement.

Dans la même veine, on peut combiner diverses méthodes possibles pour terminer le séchage et refroidir le grain à l'extérieur du séchoir à haute température. On appelle cette façon de procéder une combinaison de méthodes de séchage.

Si on utilise la combinaison de méthodes de séchage, il faut transporter le grain chaud du séchoir à haute température dans la cellule d'entreposage pour le faire refroidir. Voici diverses combinaisons de méthodes de séchage :

- le refroidissement dans la cellule
- le trempage et le refroidissement dans la cellule (refroidissement lent différé)
- le refroidissement et le séchage dans la cellule.

Pour le refroidissement dans la cellule, le grain chaud à un degré d'humidité de 15 à 16,5 % est transporté dans une cellule d'entreposage à long terme. Jusqu'à 40 % de la surface du plancher de la cellule est perforée et le débit d'air qui passe dans la cellule varie entre 5 et 10 (L/s) par mètre cube.

Pour le trempage et le refroidissement dans la cellule, le grain chaud dont le degré d'humidité varie entre 16,5 et 18 % est transporté dans une cellule d'entreposage temporaire où toute la surface du plancher est perforée. Le débit d'air qui passe à travers la cellule varie entre 5 et 10 (L/s) par mètre cube.

Pour le refroidissement et le séchage dans la cellule, le grain chaud dont le degré d'humidité varie entre 20 et 22 % est transporté à une cellule d'entreposage à long terme où toute la surface du plancher est perforée. Le débit d'air dans la cellule varie entre 5 et 20 (L/s) par mètre cube pour un séchage à l'air naturel ou à basse température (tableaux 3 à 8).

3.22 Refroidissement dans la cellule

Faire fonctionner le ventilateur de façon continue durant et après le séchage jusqu'à ce que tout le grain soit refroidi à la température ambiante. Pour refroidir le grain, il n'est pas nécessaire de le transporter dans une cellule d'entreposage à long terme. Il faut s'attendre à ce que le taux d'humidité du grain baisse de 1 % pour la plupart des récoltes et de 2 % dans le cas du maïs. Le système utilise la chaleur sensible dans le grain pour aider au refroidissement.

Afin d'éviter la condensation sur les murs de la cellule, faire fonctionner le ventilateur dès que le grain chaud entre dans la cellule. Un plancher dont toute la surface est perforée et un débit d'air suffisant contribuent aussi à éliminer les problèmes de condensation. Sinon, il faut transporter le grain à une cellule d'entreposage à long terme.

Refroidir complètement le grain à 0 °C. À la section 3.1, vous trouverez des renseignements plus détaillés sur le refroidissement.

3.23 Trempage et refroidissement dans la cellule (refroidissement lent différé)

Le grain chaud qui provient du séchoir entre dans la cellule de refroidissement lent différé où le grain trempe sans débit d'air pendant au moins 4 à 6 h avant d'être lentement refroidi.

La capacité réelle du séchoir à air chaud augmente s'il n'est pas utilisé pour le refroidissement. Ajouter un autre brûleur dans la section de refroidissement qui fait partie du système de séchage à débit continu pour que la chaleur à l'intérieur de la colonne du séchoir atteigne son maximum. Dans un séchoir statique, éliminer complètement le temps de refroidissement.

Immédiatement après le séchage à air chaud, la partie externe du grain est plus sèche que le centre. Au cours du trempage, l'humidité se répand de façon uniforme dans le grain. Un refroidissement lent après le trempage permet d'abaisser le taux d'humidité de deux ou trois degrés. La baisse du taux réel d'humidité au cours du refroidissement est proportionnelle à la différence entre la température initiale du grain et celle de l'air ambiant. Par contre, si l'on procède à un refroidissement rapide dans le séchoir, la baisse du taux d'humidité sera faible.

Parce qu'il y a moins d'humidité à enlever dans le séchoir à haute vitesse au cours du refroidissement lent différé, le séchoir peut contenir plus de grain. Ce processus utilise la chaleur qui se trouve dans le grain pour faire évaporer une partie de l'humidité durant le refroidissement. Par conséquent, le système consomme moins de carburant pour faire fonctionner le séchoir à air chaud.

Le refroidissement lent différé réduit les risques de dommages causés aux grains durant les dernières étapes de séchage à l'air chaud et de refroidissement. Il permet également de réduire le craquement et l'endommagement des écales. L'amélioration de la qualité des écales produit un grain plus résistant aux différentes manipulations qui vont suivre.

Quand vous avez recours à cette méthode, augmentez la température de l'air dans le séchoir à air chaud puisque le grain qu'on y décharge possède un plus haut taux d'humidité et demeure moins longtemps dans le séchoir que lorsqu'on utilise les autres combinaisons de méthodes de séchage. En élevant la température de l'air dans un séchoir à air chaud, on peut ainsi traiter une plus grande quantité de grain et réaliser des économies de carburant. Toutefois, si l'on augmente la température de l'air pour le séchage, il faut surveiller de près la qualité du grain en déterminant le poids et la qualité de mouture et en décelant toute germination ou craquement des écales.

Quand on a recours au refroidissement lent différé, l'importance des économies de carburant et de l'augmentation de la capacité du séchoir varie selon les conditions atmosphériques, les températures du grain et les taux d'humidité. En général, on peut réaliser des économies de 20 à 40 % et augmenter la capacité du séchoir de 50 à 75 %. Ces économies d'argent et d'espace sont d'autant plus importantes quand le grain est peu humide.

Pour ce genre de refroidissement, il faut régler le débit d'air entre 5 et 10 (L/s) par mètre cube de grains. Un débit d'air moindre absorbe une plus grande quantité d'humidité, mais augmente les risques de dommages aux grains.

Une fois l'opération terminée, le grain est transporté de la cellule de refroidissement lent différé à une cellule ventilée pour le trempage. Durant le trempage, il peut y avoir de la condensation dans le grain qui se trouve près du mur de la cellule. Afin d'éviter ce problème, ne pas entreposer le grain dans les cellules de refroidissement lent différé à moins que toute la surface des cellules soit perforée. La figure 13 illustre la méthode du refroidissement lent différé.

3.24 *Gestion des systèmes de refroidissement lent différé* Il faut au moins une cellule distincte pour le refroidissement. Disposer le séchoir et les cellules de refroidissement de façon à faciliter le transport du grain d'une cellule à l'autre ainsi que le transport du grain refroidi à l'entreposage. Idéalement, il faudrait deux cellules de refroidissement ou plus, chacune ayant une capacité de séchage d'un minimum de 24 heures.

Il faut décharger le grain chaud dans la cellule de refroidissement durant la journée et le faire tremper sans faire fonctionner les ventilateurs. Lorsque le premier grain chaud déchargé dans la cellule a fini de tremper, on commence à faire fonctionner le ventilateur tout en continuant de décharger d'autre grain chaud dans la cellule. Régler les ventilateurs de refroidissement pour qu'ils s'allument le soir si le grain chaud est d'abord déchargé dans la cellule le matin.

Le matin suivant, il faut partir le séchoir dans la deuxième cellule de refroidissement lent différé. Une fois l'opération terminée, le grain est ensuite transporté à l'entreposage. Alterner le processus de refroidissement d'une cellule à l'autre chaque jour.

Les cellules de refroidissement à grande capacité peuvent contenir sans danger plus de grains que la quantité qui sèche dans une journée. Alors, si le système ne comporte qu'une seule cellule de refroidissement, il faut en choisir une assez grande pour contenir la quantité de grains qui nécessite plusieurs jours de séchage. Au départ, il importe de vérifier et d'évaluer le taux de refroidissement précis pour le système de ventilation et de la cellule. Utiliser un compteur de 24 h ou une minuterie qui peut assurer le fonctionnement du ventilateur pendant une à deux heures. Ces compteurs permettent à l'exploitant de régler le temps de fonctionnement du ventilateur pour n'importe quel pourcentage de la période totale du refroidissement.

Pour le refroidissement lent différé, faire pousser l'air vers le haut de la cellule de façon qu'il sorte au sommet. Dans la plupart des cas, le ventilateur de refroidissement fonctionne tandis que le séchoir à air chaud continue de décharger du grain chaud dans la cellule. Avec un débit d'air dirigé vers le haut, la chaleur et l'humidité qui ont été enlevées du dernier grain déchargé dans la partie supérieure de la cellule ne nuisent pas au grain qui se trouve au fond de la cellule. L'air dirigé vers le haut cause une grande condensation sur le toit et sur les parties supérieures des murs de la cellule, surtout lorsqu'il fait froid. Néanmoins, quand le grain refroidi passe d'une cellule à l'autre, la

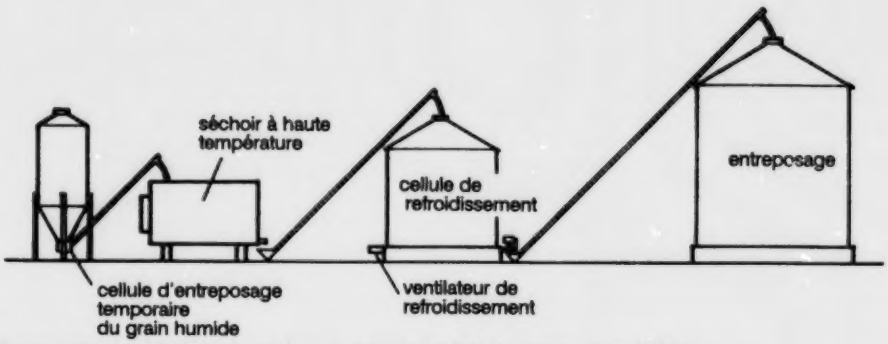


Fig. 13. Trempage et refroidissement dans la cellule (refroidissement lent différé).

petite quantité de grain humide autour des murs se mélange au reste du grain dans la cellule et les problèmes d'entreposage sont ainsi évités.

Il importe de concevoir un système de séchage facile à utiliser. Le système requiert en particulier deux vérifications essentielles pour l'entretien. D'abord, l'exploitant doit vérifier le taux d'humidité du grain avant et après le refroidissement. Ensuite, il lui faut mesurer périodiquement la température du grain chaud qui a été déchargé du séchoir et celle du grain refroidi dans les cellules.

Utiliser un thermomètre à sonde pour surveiller le processus de refroidissement dans la cellule. Se servir de câbles pour mesurer la température dans les cellules de 500 m^3 et plus. Un thermomètre d'intérieur-extérieur avec une ampoule placée dans la sortie d'air supérieure aide à surveiller la température au cours du refroidissement. Il ne faut pas oublier toutefois qu'une basse température dans la partie supérieure de la cellule signifie que tout le grain est refroidi; le grain dans le centre supérieur de la cellule se refroidit en dernier. Vérifier aussi le grain dans le centre de la cellule au moyen d'un thermomètre à sonde. Ne pas fermer le ventilateur si la cellule contient encore du grain chaud.

Faire attention quand vous inspectez les cellules durant le refroidissement du grain chaud. Il peut être dangereux de respirer l'air chaud et humide qui sort du grain. Lorsque de telles conditions prévalent, ne pas descendre dans la cellule. Il faut être prudent même lorsque vous regardez dans la cellule à travers la porte parce que les planchers en métal peuvent être glissants et vos lunettes de protection peuvent s'embuer ce qui double les risques.

3.25 Refroidissement et séchage dans la cellule

Dans ce système, le séchage à air chaud précède dans une installation le refroidissement en entreposage et le séchage à l'air naturel, dans une autre installation, il précède le séchage à basse température. L'humidité enlevée durant la phase de séchage à l'air chaud dans ce système à deux étapes est moindre que celle qui a été enlevée durant le séchage à une seule étape; toutefois, le refroidissement et le séchage dans la cellule requiert moins de propane ou de gaz naturel. Le total des économies réalisées varie en fonction du taux d'humidité du grain qui a été déchargé du séchoir à air chaud. Cependant, le ventilateur utilisé dans ce système à deux étapes doit être alimenté par une plus grande énergie électrique. Pourtant, dans l'ensemble, les systèmes de refroidissement et de séchage dans la cellule nécessitent considérablement moins d'énergie que les systèmes qui utilisent les séchoirs à air chaud à la fois pour le refroidissement et le séchage.

Dans un tel système, le séchoir à air chaud peut sécher une beaucoup plus grande quantité de grain. L'humidité retirée dans le séchoir de ce système est moindre que celle des autres systèmes de séchage. Dans un séchoir à débit continu, on peut installer dans la section de refroidissement du séchoir un brûleur au propane afin d'augmenter davantage la capacité de séchage. Les systèmes de refroidissement et de séchage dans la cellule peuvent augmenter jusqu'à 300 % la capacité des séchoirs à air chaud.

3.26 *Utilisation des systèmes de refroidissement et de séchage dans la cellule* Ne pas dépasser les taux d'humidité recommandés pour le déchargement du séchoir à air chaud dans la cellule de refroidissement et de séchage. Durant la première année d'exploitation, réduire le taux d'humidité à 20 % ou moins dans le séchoir à air chaud jusqu'à ce vous ayez acquis de l'expérience, surtout pour mesurer le taux d'humidité d'un grain chaud et humide.

Il est difficile de mesurer avec précision le taux d'humidité du grain chaud. Prendre des échantillons dans le grain refroidi afin d'établir des paramètres de contrôle pour la cellule. Avec les débits d'air utilisés dans le séchage à l'air naturel, le grain se refroidit normalement

une ou deux heures après avoir été mis en cellule.

Partir les ventilateurs de séchage dans la cellule dès que le grain chaud commence à être déchargé. Cela permet de prévenir une condensation nuisible sur les murs de la cellule. Durant le refroidissement dans la cellule, l'air chaud et humide qui sort du grain se condense sur le toit et les avant-toits. La condensation pose un problème lorsque l'eau s'accumule, descend le long des charpentes et dégoutte à un endroit.

Le tuyau de descente jusqu'à la cellule peut causer des problèmes parce que l'air humide qui monte dans le tuyau se refroidit et se condense et l'eau redescend dans la cellule. Fermer l'entrée du tuyau au-dessus de la cellule afin d'empêcher l'air de monter dans le tuyau. On peut installer des couvercles à ressort qui se ferment automatiquement lorsque le grain cesse de descendre dans le tuyau, mais ils nécessitent un entretien régulier. L'utilisation d'un ventilateur complémentaire installé sous le toit permet de ventiler l'espace au-dessus du grain et limite ainsi la condensation, mais cette solution nécessite des entrées d'air supplémentaires sous le toit de la cellule.

Mis à part ces quelques mesures spéciales, les systèmes de refroidissement et de séchage dans la cellule requièrent à peu près les mêmes méthodes de gestion que les systèmes de séchage à l'air naturel ou à basse température, y compris le réglage du débit d'air, le fonctionnement des ventilateurs et la vérification de l'état du grain (section 3.24).

3.27 Choix des ventilateurs et conception du système

Une sélection et conception de composantes appropriées, une bonne installation et de sages pratiques de gestion garantissent un rendement satisfaisant du système de refroidissement et de séchage du grain. Avant de concevoir le système, il importe de connaître les cultures à entreposer et les dimensions de la cellule d'entreposage. Ces données, en plus de fournir des renseignements précis sur les applications prévues, permettent de déterminer la taille ou le choix des ventilateurs, des conduits, des entrées et sorties d'air et des connexions. Elles aident aussi à calculer les surfaces de plancher à perforer. Vous trouverez dans les ouvrages de référence cités à la fin de ce manuel des renseignements pour chaque application.

En particulier, établir les critères de conception suivants :

- le débit d'air
- la capacité du ventilateur
- la pression statique.

Déterminer le débit d'air en fonction de la récolte et du volume de la cellule. Utiliser les chiffres fournis aux tableaux 3 à 8.

Ces tableaux donnent le niveau de risque pour chaque débit d'air dans des conditions précises. Pour une récolte et un taux d'humidité donnés, le taux d'endommagement varie uniquement en fonction des conditions atmosphériques.

Par exemple, le tableau 6 reflète les conditions atmosphériques réelles enregistrées pendant une période de 12 ans entre 1962 et 1973. Le taux de séchage du maïs à l'air naturel et le taux d'endommagement du maïs dans les conditions ambiantes diffèrent à chaque année. L'expression «deuxième plus mauvaise année» signifie que le grain a séché avant de s'endommager au cours des douze années sauf une, compte tenu du débit d'air indiqué au tableau. L'expression «la plus mauvaise année» indique le débit d'air pour prévenir les dommages durant les 12 mêmes années.

Les tableaux 3 à 8 fournissent également une liste de conditions pour déterminer le débit d'air nécessaire.

La pression statique contre laquelle doit travailler le ventilateur, et par conséquent la chute de pression (Δp) dans le grain, varie en fonction de la résistance au débit d'air, la profondeur du grain (H_g), les effets de l'utilisation d'un épandeur de grain (K_s) et ceux de la perforation d'une surface moindre que la surface totale du plancher de l'installation d'entreposage (K_p).

La vélocité de l'air qui passe à travers le grain et le type de grain influe sur la résistance au débit d'air. La vélocité est simplement le débit d'air total (mesuré en litres par seconde) divisé par une section transversale de la cellule (mesurée en mètres). On précise à la figure 14 la chute de pression (Δp) pour plusieurs espèces de grains. Les données dans cette figure portent sur la résistance au débit d'air du colza Canola d'Argentine, un gros grain. Les variétés plus petites du colza ont une résistance au débit d'air d'environ 60 % de celle qu'on prévoit de la part du colza Canola d'Argentine (Jayas et Sokhansanj 1985).

Les effets d'un épandeur de grains peuvent augmenter la résistance du grain au débit d'air. Ce phénomène peut s'exprimer par une constante (K_s) pour chaque espèce de grains.

Grain	K_s
Orge	1,5
Maïs	2,0
Lin	1,0
Colza	2,2
Tournesol	1,5
Blé	1,3

Références : Friesen et Huminicki (1986), Jayas et Sokhansanj (1985).

Un plancher partiellement perforé augmente aussi la résistance au débit d'air selon une quantité constante (K_p) pour chaque type de grains.

% du plancher perforé	K_p pour le blé, l'orge, le tournesol, le lin, le maïs et le colza Canola
100	1,0
40	1,1
25	1,3
15	1,5

La pression statique totale du système (p_s) est représentée par la formule suivante :
$p_s = \Delta p \times H_g \times K_s \times K_p$

Choisir la taille des conduits et des raccords conformément aux principes standard définis par l'*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE).

- La vélocité dans le conduit ne doit pas dépasser 7,5 m/s (7 500 (L/s)/m^2) afin de réduire la perte d'espace et le bruit.
- Les raccords entre la sortie du ventilateur et le conduit d'approvisionnement ne doivent pas créer de brusques changements de dimension. Une expansion de 15 à 20° est souhaitable. Aussi, ne pas créer d'obstacles dans la coupe transversale des conduits.

Calculer la taille du conduit requise en mètres carrés. Diviser le total du débit d'air (litres par seconde) par 7500 (L/s)/m^2.

Déterminer la surface à perforer par rapport au débit d'air total. La vélocité de face souhaitée (le débit d'air par unité de surface de grain dans la cellule) varie en fonction du pourcentage de la surface du plancher perforée et du type de grains. Pour la vélocité maximale recommandée, on peut généraliser comme suit :

- céréales 200 mm/s
- colza Canola 75 mm/s

Il importe de remarquer que les unités de mm/s sont utilisées au lieu des (L/s)/m^2 dans la plupart des applications et sont équivalentes.

Choisir la taille des évents de la cellule afin d'obtenir une vélocité de sortie de moins de 5000 (L/s)/m^2. Cette valeur augmente le débit. Pour les évents avec canaux de ventilation, il faut utiliser la superficie de l'ouverture de déchargement réel (superficie non limitée) pour calculer la vélocité de sortie.

Une bonne ventilation du volume d'air au-dessus du grain doit excéder le débit de l'air à travers le grain. On doit ménager une sortie pour le surplus de débit d'air afin d'empêcher l'effondrement du toit et choisir les conduits pour obtenir une vélocité de sortie inférieure à 5000 (L/s)m^2.

3.28 Exemples de calculs

3.29 *Paramètres du système de ventilation* Calculer les paramètres du système pour une charge de blé à ventiler dans une cellule avec un diamètre de 7,3 m et une hauteur d'avant-toit de 6,7 m. Utiliser un épandeur de grains pour charger la cellule. Choisir le débit d'air maximum commun indiqué dans le tableau 11 et voir la figure 14.

Niveau de la profondeur du grain (H_g) = 6,7 m

Débit d'air requis

= débit d'air commun × profondeur du grain

= 2 (L/s)/m^3 × 6,7 m

= 13,4 (L/s)/m^2

Débit d'air

= débit d'air requis × surface du grain

= 13,4 (L/s)/m^2 × π × (7,3/4) m^2

= 561 L/s

La surface perforée minimale pour un système de ventilation recommandée au tableau 11 est de 15 %. Le facteur de la résistance au débit d'air (K_p) pour une surface perforée de 15 % est de 1,5.

Pression statique requise (p_s)

= $\Delta p \times H_g \times K_p \times K_s$

= 54 Pa/m × 6,7 m × 1,5 × 1,3

= 706 Pa

Tableau 11 Conception de base recommandée pour diverses méthodes de séchage et de refroidissement

Méthode	Pourcentage au-dessus de sec	Débits d'air communs (L/s·m³)	Surface minimal du plancher perforée (%)	Transfert pour entreposage final
Ventilation	0	1–2	15	non
Séchage à l'air naturel	3–6	10–30	100	non
Refroidissement lent différé	2–3	5–10	40 100	oui non
Refroidissement dans la cellule	1	5–10	40	non

Remarque : Choisir les débits d'air et les surfaces de plancher perforées en fonction des conditions atmosphériques locales, du degré d'humidité initial, de la valeur de la culture et des possibilités financières.

Référence : Friesen et Huminicki (1986).

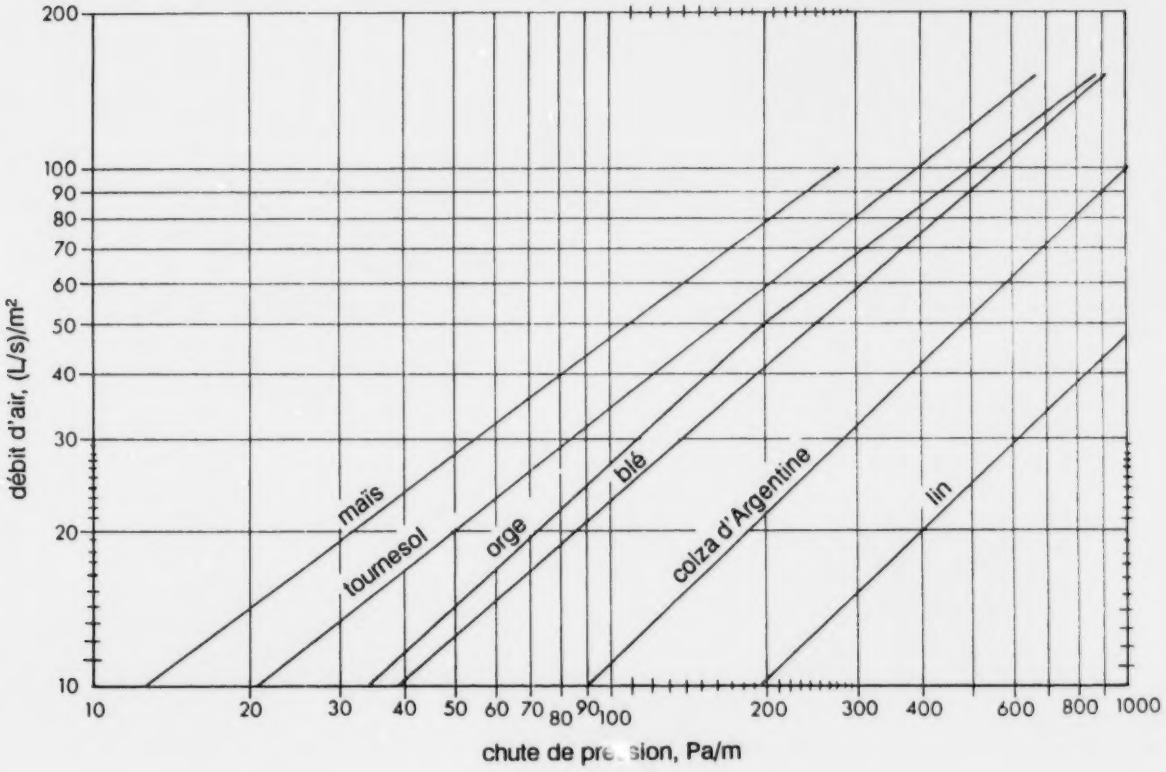


Fig. 14. Résistance des grains et oléagineux au débit d'air.

Où Δp = chute de pression dans le grain

= 54 Pa/m quand le débit d'air est de 13,4 (L/s)/m² selon les données à la figure 14.

H_g = profondeur de la cellule (m)

K_p = résistance au débit d'air de 15 % du plancher perforé

K_s = 1,3 parce que la conception exige un épandeur

Taille minimale du conduit

= débit d'air × vélocité maximale dans le conduit

= 561 L/s / 7500 (L/s)/m²

= 0,075 m²

Taille minimale de l'évent de la cellule

= débit d'air x vélocité maximale à la sortie

= 561 L/s / 5000 (L/s)/m²

= 0,11 m²

3.30 *Refroidissement de l'orge à l'entreposage* Calculer les paramètres du système pour une charge d'orge à refroidir en entreposage dans une cellule ayant un diamètre de 5,8 m et une hauteur d'avant-toit de 4,7 m. Dans le tableau 11, choisir un débit d'air commun de 8 (L/s) m³ pour le refroidissement dans la cellule.

Niveau de profondeur du grain (H_g)

= 4,7 m

Débit d'air requis

= débit d'air commun × profondeur du grain

= 8 (L/s)/m³ × 4,7 m

= 37,6 (L/s)/m²

Débit d'air

= débit d'air requis × surface du grain

= 37,6 (L/s)/m² × π × (5,8/4) m²

= 993 L/s

La perforation minimale du plancher recommandée pour un système de refroidissement dans la cellule est de 40 % (tableau 11). La résistance au débit d'air (Kp) pour une surface perforée de 40 % est 1,1.

Pression statique requise (p_s)

= $\Delta p \times H_g \times K_p \times K_s$

= 146 Pa/m × 4,7 m × 1,1 × 1,0

= 755 Pa

Où Δp = chute de pression dans le grain

= 146 Pa/m pour l'orge quand le débit d'air est de 37,6 (L/s)/m² selon les données à la figure 14.

H_g = profondeur de la cellule (m)

K_p = perte de charge parce que la surface perforée est moindre que la surface totale du plancher

K_s = 1,0 parce qu'un épandeur n'est pas utilisé

Taille minimale du conduit

= 993 L/s / 7500 (L/s)/m²

= 0,13 m²

Taille minimale de l'évent de la cellule

= 993 L/s / 5000 (L/s)/m²

= 0,20 m²

3.31 *Séchage du blé à l'air naturel* Calculer les paramètres du système pour une charge de blé à sécher à l'air naturel dont le taux d'humidité initial s'élève à 18 % et qui se trouve dans une cellule avec un diamètre de 6,7 m et une hauteur d'avant-toit de 6,1 m. Le blé a été récolté le 15 septembre à Swift Current, en Saskatchewan.

Le tableau 5 indique un débit d'air recommandé de 4,4 (L/s)/m³ pour un blé dont le taux d'humidité est de 18 %. Toutefois, on propose au tableau 11 un débit d'air commun de 10 à 30 (L/s)/m³ pour tout séchage à l'air naturel. Pour la conception du système, il est préférable de fonder votre décision sur une prévision d'un taux d'humidité variable, disons entre 16 et 20 %. Choisir alors un débit d'air de 13 (L/s)/m³.

Niveau de profondeur du grain (H_g)

= 6,1 m

Débit d'air requis

= débit d'air commun × profondeur du grain

= 13,0 (L/s)/m³ × 6,1 m

= 79,3 (L/s)/m²

Débit d'air

= débit d'air requis × surface du grain

= 79,3 (L/s)/m² × 35,3 m²

= 2796 L/s

La perforation minimale du plancher recommandée pour le séchage à l'air naturel est de 100 % (tableau 11). Le facteur de la résistance au débit d'air (K_p) pour une surface perforée de 100 % est de 1,0.

Pression statique requise (p_s)

= $\Delta p \times H_g \times K_p \times K_s$

= 420 Pa/m × 6,1 m × 1,0 × 1,0

= 2562 Pa

Où Δp = chute de pression dans le grain
= 420 Pa/m pour l'orge quand le débit d'air est de 79,3 (L/s)/m³ selon les données à la figure 14.
H_g = profondeur de la cellule (m)
K_p = perte de charge parce que la surface perforée est moindre que la surface totale du plancher.
K_s = 1,0 parce qu'un épandeur n'est pas utilisé

Taille minimale du conduit
= débit d'air × vélocité maximale dans le conduit
= 2796 L/s / 7500 (L/s)/m²
= 0,37 m²

Taille minimale de l'évent de la cellule
= débit d'air × vélocité maximale à la sortie
= 27965 L/s / 5000 (L/s)/m²
= 0,56 m²

3.32 *Refroidissement lent différé du maïs* Calculer les paramètres du système pour une charge de maïs à refroidir de cette façon dans une cellule ayant un diamètre de 7,3 m et une hauteur d'avant-toit de 6,5 m. Utiliser un épandeur de grains et transporter le maïs dans une cellule d'entreposage après le refroidissement. Choisir un débit d'air commun de 10 (L/s)m³ (tableau 11).

Niveau de profondeur du grain (H_g)
= 6,5 m

Débit d'air requis
= débit d'air commun × profondeur du grain
= 10 (L/s)/m³ × 6,5 m
= 65 (L/s)/m²

Débit d'air
= débit d'air requis × surface du grain
= 65 (L/s)/m² × 41,9 m²
= 2725 L/s

La perforation minimale du plancher pour le refroidissement lent différé est de 40 % quand le grain est transporté à la cellule d'entreposage final pour le refroidissement. Le facteur de la résistance au débit d'air (K_p) pour une surface perforée de 40 % est de 1,1.

Pression statique requise (p_s)
= $\Delta p \times H_g \times K_p \times K_s$
= 157 Pa/m × 6,5 m × 1,1 × 2,0
= 2245 Pa

Où Δp = chute de pression dans le grain
= 157 Pa/m pour l'orge quand le débit d'air est de 65 (L/s)/m³ selon les données à la figure 14.
H_g = profondeur de la cellule (m)
K_p = perte de charge parce que la surface perforée est moindre que la surface totale du plancher
K_s = 2,0 parce que la conception exige un épandeur

Taille minimale du conduit
= débit d'air × vélocité maximale dans le conduit
= 2725 L/s / 7500 (L/s)/m²
= 0,36 m²

Taille minimale de l'évent de la cellule
= débit d'air × vélocité maximale à la sortie
= 2725 L/s / 5000 (L/s)/m²
= 0,55 m²

4 CRITÈRES DE SÉLECTION DU SYSTÈME

Les systèmes d'entreposage et de conditionnement du grain comptent quatre composantes interdépendantes :

- entreposage
- séchage
- unité de séchage et d'entreposage
- manutention des produits.

Il faut procéder à plusieurs évaluations pour les décisions qui portent sur le choix des composantes du système. L'information fournie dans les trois premières parties du manuel devrait vous aider à comprendre comment prendre de telles décisions. Cette partie du manuel vise à vous guider dans le choix réel des composantes d'un système complet d'entreposage et de conditionnement du grain.

4.1 Entreposage

Déterminer d'abord le volume requis. Les industries évaluent habituellement le volume d'entreposage requis en fonction de leurs besoins stratégiques. Elles prévoient au minimum un volume d'entreposage suffisant pour conserver des stocks de façon à garantir une exploitation ininterrompue pendant le mauvais temps ou les congés. Une capacité d'entreposage supérieure au volume minimal permet à l'industrie de profiter des fluctuations du prix ou de la demande.

Les exploitations commerciales évaluent généralement leurs besoins d'entreposage en fonction de la production annuelle prévue, divisée par le nombre de renouvellements de stocks requis pour rendre l'installation viable du point de vue économique. Les renouvellements se produisent habituellement de 7,5 à 10 fois par année pour les installations récentes à l'intérieur des terres. Le volume brut est divisé par le nombre de cellules requises pour accueillir les récoltes et classer les produits dans la région. Le nombre de récoltes et de classes de produits varie entre 15 et 35. La productivité de la région et les distances de transport raisonnables par camion déterminent la production annuelle prévue. La capacité varie normalement entre 3 500 à 5 000 tonnes pour les installations à l'intérieur des terres et de 25 000 à 75 000 tonnes pour les installations terminales.

La productivité des exploitations agricoles et les marchés choisis par les exploitants déterminent les besoins d'entreposage à la ferme.

Si le grain est mis en marché selon des quotas ou pour l'alimentation du bétail, le système doit fournir de l'entreposage pour presque toute la récolte. Les cultures sur demande ou à contrat ne nécessitent pas d'entreposage parce qu'elles sont habituellement transportées directement du champ au marché.

Le nombre de cellules nécessaires varie selon le type de culture et le volume requis. La profondeur de la cellule dépend beaucoup du type de culture étant donné que ce paramètre influe sur la détérioration du produit pendant le remplissage. La nécessité de faire passer de l'air à travers la cellule durant l'entreposage en limite aussi la hauteur. Les restrictions concernant la profondeur de la cellule régissent ensuite la surface transversale totale des cellules. Enfin, la dimension horizontale pratique de la cellule ainsi que le nombre de variétés et classes de produits agricoles cultivés d'habitude dans la région déterminent le nombre minimum de cellules.

Le plus petit nombre de cellules qui satisfont aux critères susmentionnés représente le volume d'entreposage le plus économique possible dans une situation donnée.

Les installations d'entreposage sont normalement construites en bois, en béton ou en acier. Les caractéristiques naturelles du bois à titre de matériau isolant offrent l'avantage d'une réduction de l'humidité et des problèmes qui sont reliés à l'entreposage. Les greniers à grains en bois reviennent assez chers pour de petits volumes et sont plus vulnérables aux dommages causés par les rongeurs et les incendies.

Si on veut installer des cellules multiples de plus de 3 500 tonnes, il faut choisir entre des cellules de béton ou d'acier. Les cellules en béton plus petites nécessitent un plus grand nombre de coffrages, ce qui fait augmenter le coût de construction initial. Les produits entreposés dans des cellules de béton ont moins besoin de ventilation parce qu'une des propriétés naturelles du béton est d'agir comme écran thermique. Néanmoins, il faut ventiler le grain que l'on prévoit entreposer pendant de longues périodes. Il importe de disposer des lecteurs et dispositifs de réglage de la température afin de déceler les premières manifestations de tout dommage possible. Toutefois, les avantages du béton, surtout pour les cellules profondes, disparaissent lorsqu'il s'agit d'entreposer des grains qui se détériorent facilement.

Les exploitations agricoles optent le plus souvent pour des cellules d'entreposage en acier en raison des diverses caractéristiques de l'acier : un faible coût en capital, un montage rapide des cellules et un grand choix dans les dimensions des cellules. Les cellules en acier n'offrent pas la protection thermique et les caractéristiques isolantes des cellules en béton ou en bois, mais se prêtent bien au développement modulaire et à l'expansion du système.

Afin d'obtenir une efficacité structurale optimale dans la tension circonférentielle, les cellules en acier sont habituellement cylindriques. Les cellules carrées sont seulement rentables dans les endroits où l'espace est limité, par exemple, les cellules de travail utilisées par une exploitation de transformation secondaire. Les cellules rondes dont le diamètre dépasse 4 m sont ondulées afin d'offrir une stabilité sectionnelle en utilisant un minimum d'acier.

Pour les cellules hautes, l'épaisseur de la paroi augmente du sommet au fond de la cellule afin qu'elles puissent supporter la charge supérieure. Toutefois, les cellules basses dépendent totalement de la stabilité sectionnelle de la paroi pour ne pas s'écrouler. Plus haute est la cellule, plus la charge verticale produite par la friction du matériel sur les parois augmente considérablement. En raison de ces grandes pressions verticales, il importe d'utiliser des renforts ou mini-colonnes boulonnés à la paroi de la cellule afin d'augmenter la capacité de charge verticale. Pour que la structure de la cellule soit solide, il faut bien attacher les panneaux de la paroi à ces colonnes avec des renforts placés au bas des colonnes. Il importe de suivre les instructions

du fournisseur pour attacher et renforcer les pièces de la cellule.

Bien que des renforts présentent l'important avantage d'augmenter la hauteur possible de la cellule d'entreposage construite en acier de faible résistance, ils ont un inconvénient, celui d'être très chers. Cependant, comme les renforts sont un moyen efficace d'augmenter la durée de vie de la cellule d'entreposage, leur coût élevé est amorti sur une longue période et réduit ainsi le coût total du système d'entreposage. Ils réduisent le rétrécissement de la cellule ou la compression des panneaux ondulés à long terme. Ces problèmes se produisent souvent dans les cellules non renforcées. Les renforts permettent aussi de réduire les risques d'une compression non uniforme des panneaux qui résulte d'un chargement ou déchargement de la cellule légèrement mal centré.

L'utilisation de renforts permet également de faire des économies importantes sur l'équipement de manutention des produits. Parce que les renforts permettent de construire des cellules plus hautes, on a besoin de remplir moins de cellules. Le système nécessite donc moins de transporteurs et d'équipement de déchargement. Les économies sont surtout importantes quand on n'utilise pas d'auges portatives pour charger et décharger les cellules.

Malgré les avantages des cellules hautes, il faut tenir compte d'un important inconvénient : l'augmentation de la résistance au débit d'air.

Le raccord entre les fondations et les parois de la cellule joue un rôle important, car il influe à la fois sur le rendement de la cellule en tant que structure et sur sa capacité de préserver la qualité du grain. Afin de protéger la structure et de lui permettre de supporter des charges uniformes transmises par la paroi de la cellule, le raccord doit être à niveau et uniforme. Si le raccord n'est pas uniforme, les charges verticales se concentrent sur les parois de la cellule qui peuvent fléchir. Un raccord de la paroi mal conçu peut à la limite entraîner l'effondrement de la cellule. Une fondation monolithique rigide prolonge la durée de vie de la cellule.

Les changements de température et les différentes répartitions de la charge du grain exercent certaines extensions et pressions entre la fondation et la paroi de la cellule. Il faut vérifier chaque année l'étanchéité des raccords afin d'empêcher l'humidité de pénétrer dans le fond de la cellule. L'étanchéité du raccord permet un certain mouvement différentiel et prévient la fuite de l'air qui arrive par le plancher dont toute la surface est perforée. La pression d'air peut réduire l'étanchéité ou faire ressortir tout défaut du raccord entre la paroi et la fondation. Il faut donc vérifier l'étanchéité chaque année avant de remplir la cellule et après avoir déclenché le système de ventilation dans les cellules dont toute la surface du plancher est perforée.

Installer le plancher intérieur au-dessus du raccord entre la paroi et la fondation afin de réduire la pénétration de l'humidité dans la cellule. Un autre moyen de réduire l'humidité est de donner une pente à la fondation extérieure de la cellule; cette pente s'incline en s'éloignant de la cellule.

Des aménagements variés de conduits et de planchers perforés sont aussi possibles. Certains des aménagements les plus répandus comprennent un seul conduit perforé à travers le plancher de la cellule, un conduit en forme de croix, un conduit en forme de V et une surface rectangulaire perforée au centre de la cellule. Il faut prendre soin d'aménager une surface suffisante du conduit autour du puits central de déchargement de la cellule.

Les conduits doivent également être équipés d'une auge qui contient la vis de déchargement. Sceller aussi autour du transporteur au point d'échappement de la cellule afin de prévenir toute fuite d'air. Voir à la section 3.26 les renseignements fournis sur la taille des conduits. Il faut qu'au moins 15 % du plancher soit perforé dans les cellules d'une hauteur de plus de 6 mètres.

Il est plus difficile de ventiler efficacement les cellules plates que les cellules rondes traditionnelles. Dans les cellules basses, le grain a tendance à former des tas de hauteurs variées. L'augmentation du débit d'air atténue certains des problèmes causés par une mauvaise distribution de l'air dans les cellules basses; il importe donc de régler le débit d'air à 2 ou 3 (L/s) par mètre cube du volume de la cellule. La disposition des conduits permet aussi d'améliorer la ventilation des cellules d'entreposage basses.

La figure 15 illustre des aménagements typiques de conduits pour des cellules basses. L'aménagement *A* permet seulement l'utilisation d'une partie du bâtiment pour l'entreposage ou la ventilation pendant une période de déchargement prolongée. Les conduits d'air non recouverts sont bloqués. L'aménagement *B* exige de recouvrir un seul conduit d'air du début à la fin de la ventilation.

L'aménagement des conduits donne de bons résultats si l'on en choisit bien la taille et si on les espace correctement. Il faut que le plus long trajet d'air entre le conduit et la surface du grain n'excède pas 1,5 fois le plus court trajet

d'air. On montre à la figure 16 quels doivent être le nombre de conduits et l'espacement requis. Pour les cellules d'entreposage basses remplies au niveau, l'espacement des conduits est égale à la profondeur du grain.

Pour tous les systèmes d'entreposage, il faut prévoir au moins deux cellules dont le plancher est entièrement perforé. Vous pouvez les utiliser pour n'importe quelle des méthodes décrites dans ce manuel ou simplement pour entreposer des charges de grains qui posent des problèmes jusqu'à ce que vous preniez des mesures correctrices comme, par exemple, entreposer du grain mouillé en attendant de pouvoir le charger dans un séchoir à haute température. Les possibilités et l'élimination des risques offertes par le passage de 10 à 30 (L/s) d'air ambiant à travers chaque mètre cube de grain dans une cellule perforée représentent le moyen le plus économique d'éviter des pertes de qualité et de quantité des grains. Utiliser aussi les mêmes unités d'entreposage pour le séchage à l'air naturel ou à basse température ou pour augmenter la capacité du séchoir par une combinaison des méthodes de séchage.

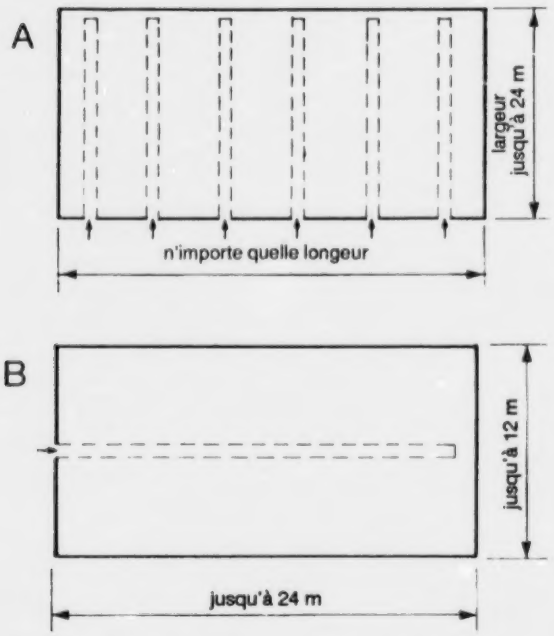


Fig. 15. Disposition des conduits d'air pour les cellules d'entreposage plates.

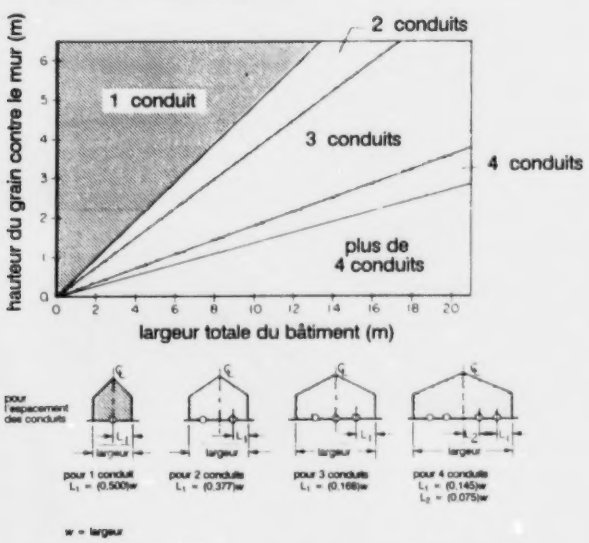


Fig. 16. Espacement longitudinal des conduits pour les bâtiments rectangulaires.

4.2 *Taille des cellules d'entreposage* Quand on choisit la taille de la cellule pour une exploitation donnée, il importe de tenir compte des facteurs suivants :

- les cultures normalement produites dans la région
- la surface moyenne du champ ensemencé avec une seule culture et la récolte normalement prévue pour chaque culture
- la résistance au débit d'air des grains à entreposer.

Du point de vue de la manutention des produits, choisir une seule taille pour les cellules qui doivent servir à une fin donnée. L'utilisation de deux ou trois tailles de cellules différentes dans le même système ne fait que rendre l'exploitation du système plus complexe.

Prendre en considération la vulnérabilité aux dommages des cultures produites dans la région. Les cultures dicotylédones, comme les pois et les haricots, ne peuvent supporter une longue chute dans des cellules d'entreposage profondes. Une longue chute endommage plus le maïs que le blé. Pour les cultures fragiles, il faut des cellules peu profondes à grands diamètres; ou on peut utiliser des déversoirs à pois qui réduisent la vitesse de la chute et diminuent ainsi les dommages causés par une longue chute dans des cellules profondes.

Pour vous aider à choisir le volume des cellules qui soit le plus économique, multiplier la surface moyenne du champ ensemencé par le rendement moyen de la plus petite récolte.

Par exemple, supposons la culture du blé dans des champs d'une surface moyenne de 65 ha. Les champs produisent en moyenne un récolte de 2,5 t/ha.

volume de la cellule

$= 65 \text{ ha} \times 2{,}5 \text{ t/ha} \times 1{,}3 \text{ m}^3\text{/t}$

$= 211 \text{ m}^3$

Il faut donc choisir des cellules de 200 m^3

Si les champs de 65 ha contenaient du lin au lieu du blé, la culture récoltée ne remplirait qu'à moitié la cellule de 200 m^3. Par contre, s'il s'agissait d'une récolte de maïs, il faudrait alors deux cellules de 200 m^3.

Une autre exploitation agricole qui cultiverait des fèves de soya dans des champs d'une surface moyenne de 20 ha aurait besoin d'une cellule de 100 m^3. Deux cellules seraient nécessaires pour entreposer le maïs récolté du même champ ou encore, on pourrait entreposer les deux récoltes en utilisant des cellules de 100 m^3 et de 200 m^3.

La résistance au débit d'air des grains à entreposer détermine le diamètre de la cellule. Les caractéristiques de fonctionnement des ventilateurs commerciaux ou industriels qui ont peu de puissance ne permettent pas de remplir la cellule à pleine capacité.

Afin de vous aider à déterminer la grosseur des cellules, calculer approximativement la pression et le débit d'air requis pour ventiler le grain (section 3.26 et tableaux 3 à 8) et renseignez-vous sur les caractéristiques des ventilateurs vendus sur le marché.

Par exemple, une exploitation qui cultive le blé dans des champs de 65 ha qui produisent 2,5 t/h a besoin de cellules d'entreposage de 200 m^3. Si l'exploitant souhaite sécher à l'air naturel du colza Canola, quel diamètre choisira-t-il pour les cellules?

Dans le tableau 11, on constate que le débit d'air requis pour le colza Canola est de 20 (L/s) par mètre cube.

Débit d'air du ventilateur

$= 20\ (L/s)/m^3 \times 200\ m^3$

$= 4000\ L/s$

Pour un tel débit d'air, un ventilateur centrifuge qui fait en moyenne 3 450 r/min produirait une pression statique d'environ 1000 Pa. Selon les données à la figure 14, une profondeur de grain de 2,3 m donnerait le débit d'air ci-dessous :

Débit d'air

$= 20\ (L/s)/m^3 \times 2{,}3\ m$

$= 46\ (L/s)/m^2$

Il en résulte une chute de pression de 420 Pa/m (fig. 14).

Perte de pression réelle

$= 420\ Pa/m \times 2{,}3\ m$

$= 966\ Pa$

D'après ces calculs, une cellule d'une profondeur de 2,3 m offre la solution la plus pratique pour le séchage du colza Canola à l'air naturel.

Vous n'avez qu'à effectuer des calculs semblables afin de déterminer la profondeur maximum pratique pour toute autre exploitation. Par exemple, une profondeur de grain de 6 m peut être acceptable si l'on sèche le grain par ventilation au lieu de le laisser sécher à l'air naturel. Autrement dit, si l'on suppose un volume d'entreposage de 200 m^3 dans une cellule avec une hauteur d'avant-toit de 2,3 m il faut choisir une cellule d'un diamètre de 11 m pour le séchage du colza Canola à l'air naturel, ou d'un diamètre de 6,8 m pour le séchage par ventilation.

Dans les régions qui ont une humidité relative de moins de 60 % où l'on cultive des grains à faible teneur d'huile, on récolte habituellement les cultures lorsqu'elles sont sèches. Les exploitants agricoles dans ces régions réservent en général quelques cellules d'entreposage au séchage à l'air naturel. Les autres cellules d'entreposage sont probablement dotées d'un système de ventilation.

Dans les régions qui ont une humidité relative souvent supérieure à 75 %, les systèmes de séchage à l'air naturel sont peu utilisés en raison de leur inefficacité par comparaison avec les systèmes de séchage à air chaud (Mittal et Otten 1982). Il faut alors choisir la dimension des cellules d'entreposage selon les volumes requis pour les récoltes et doter les cellules d'entreposage de ventilateurs afin de refroidir le grain et de maintenir des températures uniformes.

4.3 Systèmes de séchage

Deux facteurs influent considérablement sur la conception des systèmes de séchage du grain :

- les raisons du séchage
- les priorités de l'exploitation.

On fait sécher le grain pour différentes raisons qui varient selon les cultures récoltées et les conditions géographiques et atmosphériques.

L'accès à des installations de séchage est très important si l'exploitant produit des cultures qu'il faut récolter lorsqu'elles sont encore humides pour des raisons biologiques. Par exemple, les producteurs récoltent normalement le maïs humide et le sèchent pour la vente. Puisque le maïs humide est très peu vendable en raison de sa fragilité en entreposage et des coûts du transport, il faut le sécher avant de le vendre. On sèche aussi le tournesol normalement après la récolte et avant de le vendre. Par contre, le maïs destiné

au fourrage peut être entreposé même s'il est très humide.

Pour certaines cultures, le séchage est optionnel, mais il permet de faire des économies. Dans un grand nombre de cas, le manque de main-d'oeuvre oblige les exploitants agricoles à travailler continuellement à la récolte. Le séchoir fait alors partie de l'équipement normal nécessaire à la récolte. Si on laisse des cultures comme le colza Canola, les pois et les haricots sécher dans le champ, ils s'écossent avant ou pendant le passage dans la moissonneuse-batteuse. Il en résulte une perte de production. Le coût de la perte des cosses, surtout pour le colza Canola, peut dépasser celui d'une récolte hâtive et du séchage.

Il est commun d'utiliser une moissonneuse-batteuse pour un grand nombre de cultures dans les régions où les conditions atmosphériques ne permettent pas le séchage dans les andains. De cette façon, les producteurs réduisent à la fois le nombre d'opérations dans le champ et le risque de perte de qualité ou de matière sèche dans les andains.

Des conditions atmosphériques anormales peuvent forcer l'exploitant à sécher des pourcentages importants des cultures afin de pouvoir les entreposer ou les vendre.

Le type de système de séchage qui convient pour une exploitation donnée varie en fonction du degré et de la fréquence d'usage. Dans certains cas, il faut des appareils de séchage spéciaux quand, par exemple, on récolte de gros volumes d'une ou deux cultures et qu'on utilise les séchoirs annuellement.

Dans d'autres cas, pour une exploitation produisant une grande variété de cultures dont le degré d'humidité et la qualité du grain varient encore plus, il faut un système de séchage très flexible. Les installations commerciales qui offrent des services de séchage sur demande répondent à ces besoins. Elles peuvent traiter un grand éventail de cultures dans des quantités et des conditions variées.

Par ailleurs, d'autres exploitations recherchent un système simple et peu cher. Elles ont rarement besoin du séchoir ou se servirait uniquement d'un séchoir à haute température pour compléter le séchage à l'air naturel en entreposage. Un grand nombre d'installations commerciales sont dotées d'appareils pour sécher le grain qu'elles ont acheté. Il s'agit d'un grain gourd, humide ou endommagé à l'entreposage. Les installations de séchage qui reçoivent de tels produits doivent avoir des appareils simples. Elles traitent normalement de gros volumes de grains relativement secs.

L'efficacité du carburant est très importante pour un grand nombre d'exploitants. Les systèmes de conservation et de récupération d'énergie et ceux qui utilisent d'autres carburants n'ont pas encore fait leurs preuves du point de vue rentabilité. Les coûts en capital sont trop élevés pour la plupart des installations de séchage qui ne sont pas en service pour de longues périodes, c'est-à-dire pour plus qu'une récolte ou pour une exploitation commerciale. Les industries peuvent recouvrer une partie de leur investissement dans les systèmes de récupération de la chaleur, car elles utilisent leurs systèmes plus longtemps qu'une exploitation agricole normale. Les systèmes qui offrent des économies plus prévisibles et considérables sont le séchage à l'air naturel, surtout dans les régions à faible humidité, et la combinaison de diverses méthodes de séchage. Aussi, le recyclage de l'air de refroidissement dans un séchoir à débit continu peut permettre des économies de carburant de 10 à 15 %.

Pour choisir un séchoir, il importe de tenir compte de cinq facteurs :

- la capacité du séchoir à sécher le grain sans l'endommager
- l'efficacité du carburant
- la capacité du séchoir à s'adapter à une grande gamme de variétés de cultures et à retirer les pourcentages d'humidité voulus
- la vitesse de séchage qu'il offre
- la vitesse de passage du grain dans le séchoir.

Régler le taux d'enlèvement de l'humidité pour le séchoir selon la charge de grain prévue pour une période de 24 heures. La capacité quotidienne de séchage doit égaler la quantité d'eau que contient le volume de grain le plus humide que l'exploitant peut récolter durant cette période de temps.

Calculer le pourcentage d'humidité à enlever comme suit :

$$q = \left[m_f \times \frac{(1 - M_f)}{(1 - M_i)} \right] - m_f$$

où q = la quantité d'eau enlevée (kg)

m_f = le volume du grain avec le degré d'humidité final (kg)

M_f = le degré d'humidité final

M_i = le degré d'humidité initial

Par exemple, un exploitant récolte 10 t/h de maïs pendant 8 h/jour. Au départ, le maïs récolté contient 30 % d'humidité. Calculer le

taux d'enlèvement de l'humidité si l'on veut réduire le degré d'humidité du maïs à 14,4 %.

$$q = \left[1000\ \text{kg} \times \frac{(1 - 0{,}144)}{(1 - 0{,}30)}\right] - 1000\ \text{kg}$$

$$= 223\ \text{kg/t}$$

On calcule donc qu'il faut enlever 223 kg d'eau d'une tonne de maïs dont le degré d'humidité initial est de 30 % pour obtenir un degré d'humidité final de 14,4 %.
Taux d'enlèvement de l'humidité

$$= (223\ \text{kg/t}) \times (10\ \text{t/h}) \times \frac{(8\ \text{h/jour})}{24\ \text{h/jour}}$$

$$= 740\ \text{kg d'eau à l'heure}$$

Les fabricants indiquent souvent la capacité de leurs séchoirs en nombre de tonnes à l'heure de grain «séché à l'air chaud» ou «refroidi» avec une réduction de 10 % d'humidité. Le maïs à dents jaunes représente la culture la plus communément séchée dans les séchoirs commerciaux. Par conséquent, les fabricants des systèmes de séchage basent leur publicité sur le fait que leur séchoir peut enlever 10 % d'humidité de ce type de grains.

Les taux de séchage varient selon le taux d'humidité du grain, le réglage de la température du séchoir et le type de grains. Ces facteurs influent également sur la capacité du séchoir. Toutefois, il existe trois autres points importants à prendre en considération pour le choix d'un séchoir.

D'abord, le taux d'humidité du grain est calculé selon l'eau qu'il contient et non selon la matière sèche. Par conséquent, la quantité d'eau que contient une tonne de grain augmente avec le taux d'humidité du grain; cela signifie qu'il faut enlever une plus grande quantité d'eau d'un grain ayant 30 % d'humidité pour obtenir un grain à 25 % que pour sécher le même grain contenant 20 % d'humidité pour d'obtenir un grain de 15 %. Alors, il importe de choisir un système de séchage qui peut abaisser au maximum le taux d'humidité que l'on recherche.

Ensuite, l'évaporation du dernier kilogramme d'eau d'un grain sec nécessite plus d'énergie que pour l'évaporation du premier kilogramme.

Il faut donc s'assurer que le système de séchage pourra abaisser le taux d'humidité de 24 % à 14 % par exemple.

Enfin, deux facteurs influent considérablement sur la capacité du séchoir :

- la capacité de faire passer l'air dans la culture à sécher
- le taux de libération de l'humidité pour chaque culture.

Ne pas choisir un séchoir en vous fondant sur sa capacité établie pour une seule culture. Étudier également les autres usages possibles du séchoir.

Un exploitant qui sèche du maïs à un taux qui peut enlever 223 kg d'humidité par tonne a besoin de savoir le taux moyen d'enlèvement d'humidité pour le système.

La quantité moyenne d'humidité enlevée par point de pourcentage
= 223 kg/t / (30 à 14,4) %/t

= 14,3 kg/%

La quantité moyenne d'humidité pour plus de 10 points de pourcentage

= 14,3 kg × 10

= 143 kg/t

Les données sur le rendement pour enlever 10 % d'humidité des cultures sont habituellement disponibles.

La mesure de la capacité du séchoir requise pour un enlèvement de 10 % d'humidité égale la quantité totale d'eau à enlever par heure divisée par le taux d'enlèvement d'humidité par tonne pour 10 points de pourcentage

= 740 kg/h / 143 kg/t

= 5,2 t/h de grain sec

Il faut toutefois signaler que cette capacité du séchoir varie considérablement d'une culture à l'autre.

Comme on l'a déjà mentionné, la capacité du séchoir n'indique que sa capacité moyenne. Pour les séchoirs à débit continu, la capacité est une caractéristique stable. Cependant, pour les séchoirs statiques, la capacité reflète également le temps requis pour des opérations autres que le séchage comme le chargement, le refroidissement et le déchargement du grain.

4.4 Systèmes de chargement et de déchargement des séchoirs

En plus du séchoir, le système de séchage comporte :

- une cellule d'entreposage temporaire pour le chargement du grain humide
- un système de déchargement transportant le grain sec en entreposage.

Il est essentiel de ne pas oublier l'une ou l'autre de ces parties dans la conception d'un système de séchage complet.

La cellule d'entreposage temporaire contient le grain humide jusqu'à ce que le séchoir puisse le recevoir. Dans certains cas, la boîte du camion remplit cette fonction, mais il s'agit alors d'une cellule assez chère. Utiliser à la place une cellule à fond conique pour l'entreposage temporaire. Des cellules à fond plat à travers lesquelles passe un débit d'air suffisant pour éviter les dommages offrent également une solution d'entreposage temporaire.

Choisir le volume de la cellule d'entreposage temporaire en fonction de la capacité du séchoir et du taux de récolte, c'est-à-dire du tonnage à l'heure récolté. Dans l'exemple portant sur le maïs récolté au rythme de 10 t/h et séché de 30 % à 14,4 %, la capacité requise équivaut au taux de récolte moins le taux de séchage réel. Déterminer le taux de séchage réel en multipliant le taux d'enlèvement moyen de l'humidité par la capacité du séchoir et diviser le résultat par le taux d'enlèvement réel d'humidité par tonne.

Taux de séchage

$= 143 \text{ kg/t} \times 5{,}2 \text{ t/h} / 223 \text{ kg/t}$

$= 3{,}3 \text{ t/h}$

pour sécher à 14,4 % la récolte ayant un taux d'humidité de 30 %.

Capacité requise de la cellule d'entreposage temporaire

$= (10 - 3{,}3) \text{ t/h} \times 8 \text{ h}$

$= 53{,}6 \text{ t}$

Pour les séchoirs statiques, placer la cellule d'entreposage temporaire directement au-dessus du séchoir. Cet aménagement élimine pratiquement le temps de chargement et augmente donc la capacité du séchoir. Il permet également de remplir le séchoir durant le séchage sans avoir à mettre en marche un transporteur ayant une pleine charge.

Le chargement d'un séchoir à débit continu démarre rapidement le séchage. Il est aussi souhaitable de pouvoir le faire fonctionner dans un mode de recirculation de la charge durant le démarrage jusqu'à ce que le grain soit presque sec. On peut ensuite régler le système au mode continu.

On utilise d'habitude des élévateurs à auges ou à godets, régis par des lecteurs de niveau au sommet du séchoir, pour charger le grain humide dans un séchoir à débit continu. Les lecteurs régissent soit l'auge qui remplit le séchoir soit la porte coulissante (ou un transporteur) qui permet le déchargement du grain de la cellule d'entreposage temporaire dans l'élévateur à godets qui remplit le séchoir.

Les séchoirs statiques ont normalement une grande capacité de déchargement pour que leur capacité, de séchage soit utilisée au maximum. Afin de s'adapter à cette capacité le système de séchage a besoin de transporteurs à gros volume pour transporter le grain dans les cellules de refroidissement ou d'entreposage. Sinon, on peut placer les séchoirs statiques au-dessus des cellules de battage du grain sec afin d'utiliser la gravité pour décharger rapidement le grain sec. Cet aménagement permet d'augmenter la capacité du séchoir et de ne pas utiliser des transporteurs à gros volume.

Certains séchoirs à débit continu n'ont pas une capacité suffisante de déchargement pour le séchage du grain qui ne nécessite que l'enlèvement d'un faible taux d'humidité. Le séchoir se décharge plus lentement que le grain ne sèche. Vérifier le taux de déchargement du séchoir avant de l'acheter, surtout si le séchoir doit être utilisé à des fins variées.

Un grand nombre d'exploitants choisissent des transporteurs de déchargement et de transport qui satisfont à leurs besoins primaires. Si, par exemple, le système doit surtout servir à sécher du maïs dont le taux d'humidité initial varie entre 25 et 35 %, alors le séchoir à débit continu peut décharger le grain assez lentement.

Ce sont les petits transporteurs ou un système pneumatique qui offrent les moyens les moins chers de transporter le grain à plusieurs cellules d'entreposage. Toutefois, ces appareils n'ont peut-être pas la capacité de s'adapter à d'autres opérations de séchage.

Utiliser une cellule d'entreposage temporaire pour le grain sec, placée entre le principal transporteur de déchargement du séchoir et les transporteurs de distribution, afin de réduire le plus possible l'utilisation du matériel de transport auxiliaire pour décharger les séchoirs statiques. Aussi, utiliser une cellule d'entreposage temporaire pour le grain sec dans les séchoirs à débit continu qui utilisent un élévateur à godets commun pour transporter le grain humide et le grain sec.

Choisir la taille de la cellule d'entreposage temporaire en fonction de l'un des deux critères suivants :

- Le volume de la cellule d'entreposage temporaire doit au moins égaler le volume du séchoir statique.
- Le volume de la cellule doit suffire pour recevoir la quantité de grain à sécher dans le séchoir à débit continu au cours du déchargement d'un camion qui arrive.

4.5 Alimentation en courant électrique

L'alimentation en courant électrique pour les installations d'entreposage et de séchage présente souvent une importante contrainte

présente souvent une importante contrainte dans la conception du système. Le fonctionnement des ventilateurs et des transporteurs peut rarement être réglé de façon à réduire la demande en courant électrique. Aussi, le plus souvent, la période de pointe ne dure que quelques semaines ou quelques mois.

Un courant triphasé offre une importante réduction des coûts et permet d'augmenter la capacité de démarrage des moteurs sans créer une forte demande de courant. Toutefois, le coût de l'installation du courant triphasé peut être élevé, surtout lorsqu'il faut aussi payer les frais mensuels d'électricité. Vous pouvez utiliser par ailleurs une génératrice de réserve pour suppléer au courant actuel ou faire fonctionner l'installation durant les périodes de pointe comme celle du chargement. Voici trois autres moyens de réduire la consommation de courant : le contrôle du facteur courant, la réduction des périodes de pointe et le délestage. Quel que soit le moyen choisi, il demeure que l'élimination des frais de la demande de pointe est le moyen le plus efficace de réaliser des économies.

Lorsque l'humidité relative s'élève à près de 75 %, le débit d'air nécessaire pour éviter les dommages durant le séchage du grain augmente radicalement. Les ventilateurs doivent fonctionner pendant de longues périodes, de telle façon que l'énergie électrique totale nécessaire pour sécher le grain à l'air naturel dépasse celle requise pour le sécher dans un séchoir à haute température. Néanmoins, l'avantage principal du séchage à l'air naturel demeure un faible coût en capital.

Souvent, le choix d'un système de séchage repose sur le coût en énergie électrique. Les conditions atmosphériques, les variétés des cultures et le volume de production influent considérablement sur l'utilisation du séchoir et, par conséquent, sur la consommation d'énergie électrique. Ces facteurs entrent donc souvent en ligne de compte pour rationaliser les méthodes de séchage du grain.

4.6 Systèmes de manutention des produits

Pour les systèmes qui utilisent surtout des séchoirs à haute température (et non seulement comme méthode de séchage en cas de conditions atmosphériques anormales), il importe d'incorporer les séchoirs dans le système de séchage et de les installer dans un endroit pratique où il sera facile de les utiliser. S'il est difficile d'utiliser le séchoir, on risque de le sous-utiliser. Un système de séchage sous-utilisé ne produira pas les avantages économiques prévus pour compenser les dépenses de capitaux et de dépréciation importantes que l'exploitant doit subir pour cet équipement.

Un système de manutention des produits offre plusieurs avantage :

- une réduction de la main-d'oeuvre requise pour la récolte
- une diminution des pertes en volume causées par l'écossage et par les animaux sauvages
- une baisse des pertes de matière sèche
- une réduction des pertes de la qualité des produits causées par le mauvais temps
- une augmentation du volume de produits qu'on peut récolter avec l'équipement existant
- la possibilité d'une récolte faite plus tôt, ce qui laisse plus de temps pour le travail dans les champs après la récolte.

Toutefois, ces avantages sont souvent insuffisants pour justifier le coût d'un système de manutention des produits pour le séchage. Alors, les exploitants utilisent aussi le système pour :

- mieux choisir le moment de la mise en marché grâce à un meilleur accès à l'entreposage s'il fait mauvais ou s'il neige
- mélanger des grains semblables afin d'améliorer la valeur marchande d'un plus grand pourcentage de la récolte
- procéder à une transformation secondaire et à des traitements fourragers comme la préparation du fourrage, le nettoyage des grains, l'entreposage ou le séchage sur demande.

L'équipement de manutention des produits pour un système de séchage comprend surtout des appareils de chargement et de déchargement des cellules d'entreposage.

4.7 *Chargement* Une auge inclinée ou un élévateur à godets qui alimente un transporteur horizontal au-dessus des cellules d'entreposage constitue le système de chargement. Le transporteur horizontal permet le déchargement du grain à un point unique dans l'entreposage. En général, le système de chargement reçoit le grain directement des camions, des cellules d'entreposage temporaire ou des séchoirs.

Si les camions et les séchoirs à débit continu alimentent en même temps un seul transporteur, il faut choisir un transporteur à chaîne d'entraînement ou un transporteur à vis doté de paliers suspendus. Les transporteurs à vis partiellement chargés et sans palier suspendu s'usent rapidement et peuvent causer des dommages importants au grain.

Les transporteurs pneumatiques à faible volume et munis d'une chaîne d'entraînement,

qui utilisent des élévateurs à auges ou à godets, peuvent aussi transporter le grain des séchoirs à débit continu aux cellules d'entreposage. Ces transporteurs offrent une solution moins chère que les auges et les élévateurs; toutefois, en raison de leur faible capacité, leurs possibilités de chargement sont limitées. Cette contrainte élimine la possibilité de recevoir le grain d'un camion de grande capacité. Aussi, les systèmes de chargement qui utilisent des transporteurs pneumatiques à faible volume et munis d'une chaîne d'entraînement ne peuvent sécher le grain efficacement lorsqu'il s'agit d'enlever seulement une petite quantité d'eau, car ce type d'opération nécessite des débits élevés. On trouve aussi sur le marché des transporteurs pneumatiques et munis d'une chaîne d'entraînement à gros volume. Toutefois, ils ne sont pas rentables pour une exploitation agricole.

Par exemple, pour nettoyer un transporteur horizontal au cours des opérations relatives aux semences, il importe d'utiliser un transporteur pneumatique ou avec un about en forme de U et une chaîne d'entraînement. Une vélocité excessive ou une perte de charge (causée par les coudes ou la longueur de l'about) dans les systèmes pneumatiques peut nuire à la germination des grains de semence. La vélocité est aussi susceptible d'augmenter les risques de craquement des écales du grain causés par un mauvais séchoir ou le passage dans la moissonneuse-batteuse.

Installer un about en U et une chaîne d'entraînement avec des ouvertures de déchargement assez grandes pour permettre un vidage complet à l'endroit voulu. Une autre solution consiste à utiliser une chaîne d'entrainement lente afin de compenser pour les petites ouvertures de déchargement. Malheureusement, cette solution réduit aussi la capacité. Il incombe aux fournisseurs du matériel de recommander un aménagement satisfaisant du déchargement.

4.8 *Déchargement* Les systèmes de déchargement sont normalement composés d'une auge inclinée ou placée sous le plancher qui est alimentée par la gravité ou par un balayage de la cellule. Un transporteur secondaire peut consister soit en une auge inclinée qui se décharge dans un camion soit en un transporteur de collecte horizontal desservant plusieurs cellules. Les cellules à fond conique ne nécessitent pas d'appareils mécaniques pour le déchargement et offrent une bonne solution d'entreposage, mais elles coûtent cher.

L'élévation du transporteur de déchargement régit l'élévation du transporteur secondaire. Si l'élévation du transporteur de déchargement principal est insuffisante ou si les fondations ont bougé, il faut creuser pour installer le transporteur. Ne pas oublier cependant que les excavations présentent des problèmes de drainage et d'entretien, donc il faut les éviter autant que possible. Il est préférable d'élever les fondations bien au-dessus du niveau adjacent. Cela permet un bon drainage de surface en dirigeant l'eau loin des installations d'entreposage.

Il faut aussi tenir compte des mouvements des fondations dans la conception du déchargement de transition entre le transporteur de remplissage au sommet et le toit de la cellule. La prévision d'un mouvement différentiel à cet endroit peut vous épargner des travaux de réparation coûteux.

5 ENTREPOSAGE ET CONDITIONNEMENT DU FOIN

Le foin s'entrepose sans danger s'il a un degré d'humidité de 15 % ou moins. Un tel taux d'humidité prévient la croissance de moisissures dans le foin à condition qu'il soit utilisé à l'intérieur d'une période de 12 mois.

Dans les régions où le temps le permet, on peut sécher le foin dans le champ avant de le mettre en balles. Il suffit de laisser le foin coupé sécher au soleil jusqu'à ce qu'on puisse l'entreposer sans danger. Afin d'accélérer le séchage, il faut le presser ou le rouler quand vous le coupez. Cela permet de briser les tiges pour augmenter l'évaporation de l'humidité dans l'air; on réduit ainsi d'environ 50 % le temps de séchage et on augmente considérablement la qualité du foin.

La durée du séchage dans le champ tout comme la température influe considérablement sur la qualité et la quantité du foin récolté. De longues périodes de séchage augmentent les pertes de matière sèche et réduisent la valeur nutritive et la saveur du foin. La pluie ou le mauvais temps (comme un ciel nuageux, un temps trop humide ou le manque de vent) retarde le séchage.

S'il s'agit d'un foin à base de légumineuses comme la luzerne ou le trèfle, ce sont les feuilles qui contiennent le plus d'éléments nutritifs. Toutefois, au fur et à mesure que le foin sèche, les feuilles ont tendance à se séparer de la tige et se perdent facilement durant la récolte. Il peut en résulter une perte de protéines de 4 à 5 %. La protection de la valeur nutritive de ces cultures nécessite soit un séchage plus rapide ou une méthode de récolte qui permet de garder intactes les tiges et les feuilles.

On peut récolter le foin à un taux d'humidité de plus de 15 % et le sécher en entreposage plutôt

que dans le champ. Cela permet de réduire les risques de pertes de qualité du produit et de matière sèche causées par le mauvais temps.

5.1 Séchage du foin à l'entreposage

Pour sécher le foin à l'entreposage, utiliser un système de ventilation conçu pour une distribution uniforme de l'air. Choisir la grosseur des conduits de façon à produire une vélocité de l'air qui sort du conduit et pénètre dans le foin à un taux de 260 mm/s. Il importe d'avoir une vélocité de 5 m/s ou moins dans le conduit.

D'habitude, l'aménagement des conduits tourne autour d'un conduit de distribution primaire allant d'un bout à l'autre de l'installation d'entreposage. Un aménagement de conduits de distribution latéraux peut s'ajouter au conduit principal. Utiliser un seul conduit central perforé sans passages latéraux pour les installations d'entreposage ayant jusqu'à 10 m de largeur. Ajouter des conduits latéraux au conduit d'approvisionnement primaire pour les plus grandes installations. Vous trouverez aux figures 17 et 18 des exemples d'aménagements communs de conduits transversaux.

5.2 *Conditions d'entreposage sûr : débit d'air et pression statique* Généralement, on entrepose le foin par temps chaud durant l'été dans la plupart des régions où le séchage à l'air naturel est possible. Dans de telles conditions, des systèmes de séchage à l'air naturel bien conçus ne nécessitent aucune autre chaleur.

Toutefois, dans certains cas, le système d'entreposage requiert une chaleur supplémentaire et il faut utiliser un échangeur de chaleur :

- quand le taux d'humidité initial du foin est trop élevé pour le séchage à l'air naturel
- quand les conditions atmosphériques ne permettent pas l'élimination rapide de l'humidité au moyen de la ventilation de l'air naturel.

Par opposition aux échangeurs de chaleur, les appareils de chauffage à feu direct offrent un séchage plus efficace, mais présentent des risques d'incendies et il faut faire attention en les utilisant.

Le taux d'endommagement du foin augmente avec la température de l'air. Il est moins risqué de produire une chaleur supplémentaire suffisante pour réduire légèrement l'humidité relative de l'air ventilé que d'avoir recours au séchage à haute température et on peut utiliser le même débit d'air que pour le séchage à l'air naturel.

Dans la plupart des cas, il faut sécher le foin à un taux d'humidité de moins de 20 % en dedans de 3,5 jours après la coupe afin de prévenir toute croissance visible de moisissures. Déterminer la quantité d'eau à enlever du foin en faisant des calculs semblables à ceux pour le séchage du grain.

Vous vous souvenez de cette formule :

$$q = \left[m_f \times \frac{(1 - M_f)}{(1 - M_i)} \right] - m_f$$

où q = la quantité d'eau enlevée (kg)

m_f = le volume du grain avec le degré d'humidité final (kg)

M_f = le degré d'humidité final

M_i = le degré d'humidité initial

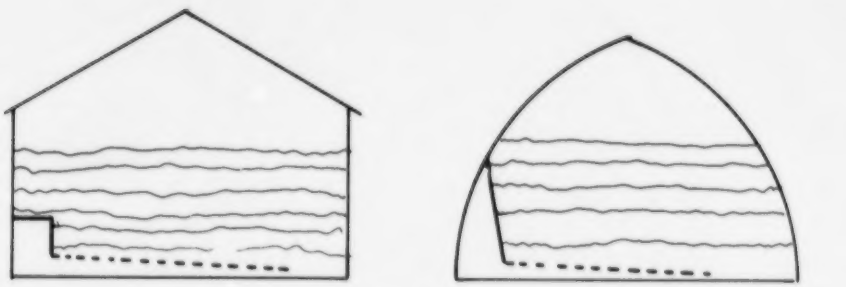
Voir la section 4.3 pour des renseignements plus détaillés.

La capacité d'élimination de l'humidité de l'air ventilé dans le foin limite le taux de séchage prévu pour un séchoir à l'air naturel. D'autres facteurs plus faciles à contrôler influent sur le taux de séchage comme le débit d'air et une distribution uniforme de l'air. Le fait de réduire le taux d'humidité de l'air qui alimente le système de ventilation augmente la capacité de séchage de ce système.

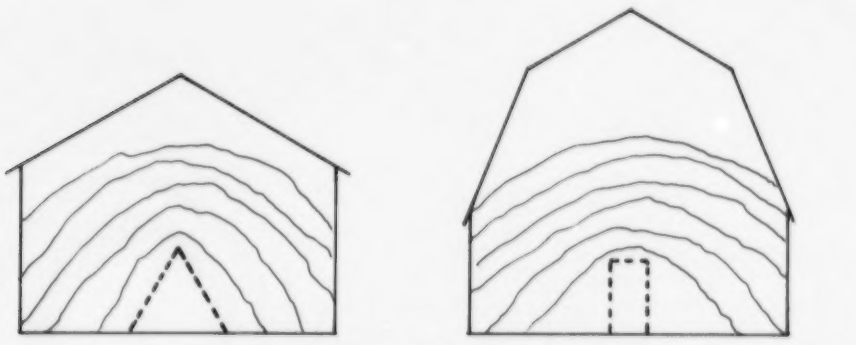
Choisir le débit d'air selon le taux de séchage requis. La température moyenne et l'humidité relative dans la région influent également sur le taux de séchage du foin. Vous pouvez utiliser les données de la météo locale et des psychromètres de base pour calculer le débit d'air nécessaire en principe. Présumer que l'humidité relative de l'air sortant des séchoirs s'élèvera en moyenne à environ 85 % avec une enthalpie constante produite par le séchoir.

Déterminer le débit d'air en vous fondant sur le taux d'humidité prévu du foin qu'il faut sécher (tableau 12). Augmenter le débit d'air si le taux d'humidité initial est plus élevé.

Il n'existe aucune information cohérente sur les corrélations entre d'une part la pression statique et d'autre part le débit d'air et la qualité du foin, soit sur le plan de la composition génétique ou physique (légumineuses ou herbes; en balles ou libres). Régler la pression statique du système entre 125 et 375 Pa; on utilise couramment 250 Pa.



conduit principal sur le côté de la meule pour l'entreposage du foin en surface



conduit principal au centre de la meule pour l'entreposage du foin en profondeur

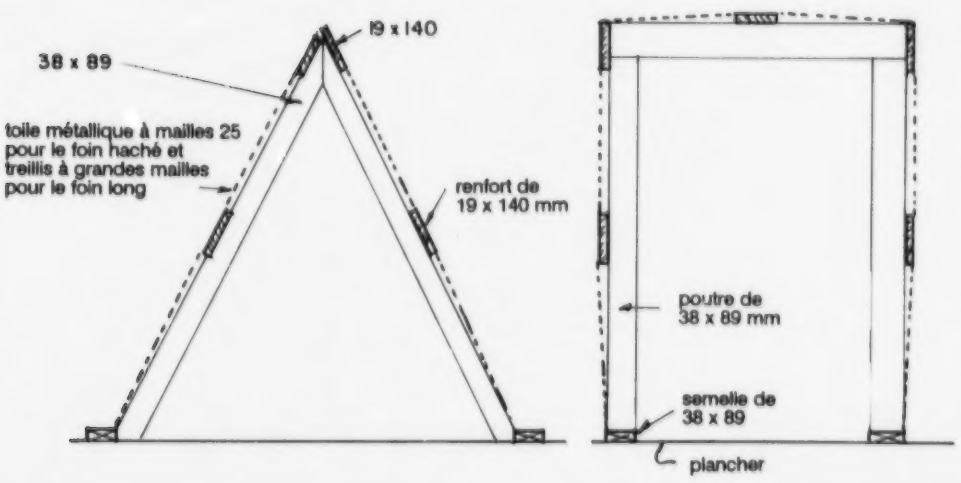


Fig. 17. Conduits de distribution primaires non doublés. Toutes les mesures sont exprimées en millimètres.

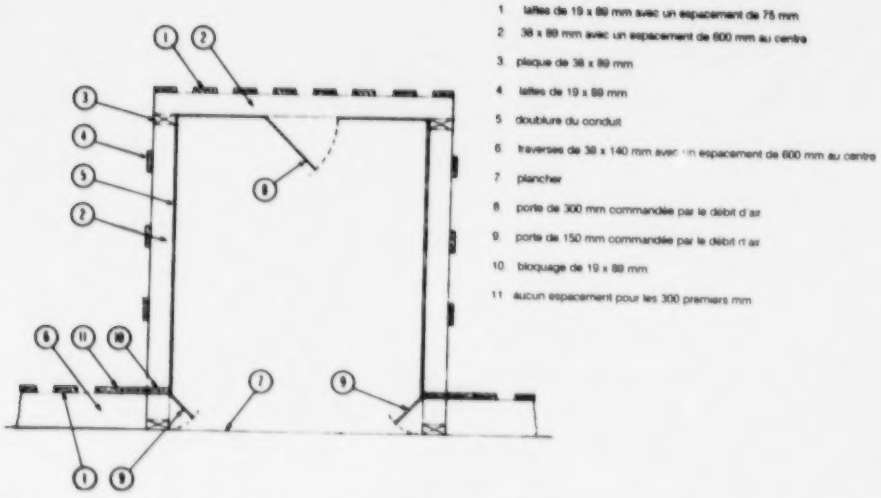


Fig. 18. Conduits de distribution rectangulaires doublés.

Tableau 12 Débit d'air selon la taille du séchoir et le degré d'humidité du foin

Taux d'humidité du foin (%)	Débit d'air	
	Surface du plancher ($L/s \cdot m^2$)	Quantité de foin ($L/s \cdot t$)
20–25	40	77
25–30	75	155
30–35	125	260

Plusieurs caractéristiques de la récolte et de l'entreposage du foin aident à expliquer les écarts de pression statique possibles.

Parce que les fibres retrécissent, le foin haché se stabilise aux environs de 10 à 15 % durant le séchage et l'augmentation de la pression est à peu près égale à la diminution du volume. Par contre, le foin mis en balle n'a pas le même effet sur la pression.

Des balles de foin trop serrées ne permettent pas à l'air de passer à travers assez rapidement pour que la récolte sèche avant de s'endommager. Par conséquent, garder la densité spécifique des balles de foin le plus bas possible, tout en maintenant l'intégrité de la balle durant la manutention.

Les balles empilées sur le côté ont une résistance plus faible au débit d'air que celles empilées à plat. Dans le séchoir, placer les balles carrées ensemble sur le côté. Afin de prévenir une fuite du débit d'air, ne pas laisser d'espace entre les balles.

La pression statique est directement proportionnelle à la vélocité de l'air qui passe à travers le foin et à la profondeur du foin entre le conduit et l'espace libre. Le tableau 13, qui s'inspire d'une publication d'Hydro Québec, offre des renseignements utiles pour évaluer la vélocité de l'air et la pression statique requises dans un système de séchage.

5.3 *Systèmes de distribution d'air* Concevoir le système de distribution d'air du séchoir à foin de façon à assurer un débit d'air uniforme dans tout le séchoir. Choisir la grosseur des conduits conformément à de bonnes pratiques d'ingénierie et selon les critères définis à la section précédente. Déterminer à la fois la surface transversale minimale pour tous les conduits et la surface d'ouverture nette minimale du conduit en contact avec le foin.

Placer dans le sens de la longueur le conduit principal de distribution d'air, soit au centre du séchoir ou sur l'un des côtés. Un conduit placé au centre fournit une bonne distribution d'air aux séchoirs jusqu'à une largeur de 10 mètres. Toutefois, afin d'assurer une distribution uniforme de l'air, il faut que la profondeur du foin au-dessus du conduit égale la distance entre le conduit et le côté du séchoir. Si la profondeur du foin est insuffisante, l'air aura tendance à passer directement au-dessus du conduit pour prendre le chemin de la moindre résistance.

Vous pouvez choisir n'importe quel aménagement pour le conduit principal. Vous trouverez aux figures 17 et 18 les aménagements les plus courants, c'est-à-dire triangulaires ou rectangulaires. Il importe d'aligner les conduits de façon à permettre un réglage manuel de l'orientation de l'air. Vous

Tableau 13 Régime du ventilateur et pression statique pour le séchage du foin en entreposage

Épaisseur du foin (m)	Foin en balles*		Foin haché*	
	Vélocité de l'air (mm/s)	Pression statique (Pa)	Vélocité de l'air (mm/s)	Pression statique (Pa)
1,83	76	190	76	250
2,30	76	190	76	250
2,75	76	250	76	250
3,20	76	250	76	250
3,70	76	250	86	310
4,10	86	250	97	310
4,60	97	250	112	375
5,30	112	310	127	375
5,80	122	375	137	440

* Avec un degré d'humidité initial de 40 %.

pouvez aussi ne pas les aligner afin de permettre une sortie d'air uniforme sur toute leur longueur.

Si les conduits ne sont pas alignés, il faut les couvrir entièrement de foin avant de démarrer la ventilation. L'alignement des conduits, par contre, permet d'utiliser efficacement une seule partie du séchoir à la fois. Utiliser des conduits alignés lorsque le volume à sécher ne remplit pas le séchoir ou s'il faut sécher seulement certaines parties de l'entreposage.

Choisir la grosseur des conduits primaires alignés de façon à assurer un accès facile pour l'exploitant. Il pourra alors mieux régler les portes contrôlant l'orientation de l'air.

Les conduits latéraux reliés au conduit d'approvisionnement primaire étendent la largeur pratique du séchoir à foin. Les conduits latéraux se présentent sous deux formes différentes : un plancher latté au-dessus des traverses du plancher ou une série de petits conduits latéraux d'un ou des deux côtés du conduit de distribution primaire.

Aménager le système de conduits de façon à ce que tous les trajets d'air dans le foin soient égaux. Par exemple, la distance entre l'extrémité du conduit et le bord du séchoir doit égaler la distance entre l'extrémité du conduit et le sommet de la pile de foin quand le séchoir est rempli.

Afin de garantir une distribution uniforme de l'air, procéder ainsi :

- Installer des planchers étanches dans le séchoir afin d'éviter toute fuite de l'air qui doit sécher le blé. Un plancher à rainure et à languette ou en béton, ou de terre offre une étanchéité suffisante. Couvrir les autres sortes de planchers d'une couche de 150 µm de polyéthylène avant d'assembler les conduits.
- Éliminer toutes les fuites d'air possibles. Les colonnes structurales dans le séchoir peuvent permettre à l'air qui doit passer à travers le foin de s'échapper. Réduire une telle fuite d'air en insérant sur la surface du plancher une couche imperméable comme du plastique sur une étendue d'au moins 0,6 m autour de la colonne.
- Veiller à ne pas perforer le conduit latéral à moins de 0,3 m du conduit de distribution primaire. Il ne faut pas perforer les conduits de distribution primaires à moins de 2 m du ventilateur.

Vérifier la solidité du plancher du séchoir à foin avant d'utiliser le séchoir. Le foin qui contient une humidité de 35 % pèse de 25 à 30 % de plus que le volume équivalent de foin séché au champ. Une balle de foin sèche a une densité d'environ 0,13 t/m^3. La densité du foin haché sec s'élève à peu près à 0,08 t/m^3.

5.4 Séchage du foin

Le séchage du foin comporte quatre étapes :

- sécher le foin dans le champ
- le placer dans le séchoir
- faire fonctionner le séchoir
- terminer le séchage.

5.5 *Séchage dans le champ* Laisser le foin sécher dans le champ jusqu'à ce qu'il atteigne un taux d'humidité de 35 % avant de le mettre en balles. Cela réduit les risques de moisissure du

foin ainsi que de pertes dans le champ et au cours de la récolte.

Régler la tension des câbles pour le foin humide comme pour le foin sec. Cette tension maintient l'intégrité de la balle tout en permettant à un débit d'air suffisant de passer à travers les balles. Une longueur de 0,85 m améliore la facilité de manutention de la balle et on peut les empiler manuellement de façon plus serrée. Une longueur de 0,6 m offre une meilleure densité et durabilité de la balle lorsque les balles sont chargées sans ordre précis dans le séchoir.

5.6 *Disposition du foin dans le séchoir* La façon de placer le foin dans le séchoir diffère si le foin est haché ou mis en balles.

Pour le foin en balles, suivre les conseils suivants :

- Dans les systèmes avec un conduit principal, couvrir le conduit avec des couches de foin égales. Procéder graduellement vers le haut et vers les extrémités en gardant les profondeurs de foin égales dans toutes les directions.
- Dans un système de plancher latté, monter la première couche au-dessus du conduit et en dépassant légèrement l'extrémité du plancher latté. Placer chaque couche consécutive comme une couverture, de façon à atteindre à la fin le bord du séchoir.
- Quand il s'agit d'un système de conduit de distribution primaire aligné avec un plancher latté, commencer à charger en laissant closes les portes au sommet du conduit principal et celles de dessous ouvertes. Lorsque le foin aura atteint une hauteur de 1 à 1,2 m au-dessus du plancher, ouvrir les portes supérieures. Une fois que le foin aura atteint une hauteur de 3 à 4 m au-dessus du conduit, fermer les portes de dessous et laisser les portes du haut ouvertes.
- Empiler étroitement les longues balles sur le côté dans des couches alternantes à 90° l'une de l'autre. Cette façon de les empiler réduit les risques de court-circuitage de l'air. On peut disposer au hasard les courtes balles dans le séchoir, à la condition que leur taux d'humidité ne dépasse pas 25 %. Boucher les trous dans les piles en plaçant manuellement quelques balles.
- Utiliser les balles de foin pour créer des mini-conduits dans un conduit central aligné lorsque le plancher n'est pas latté. Espacer les deux ou trois premières balles en s'éloignant du conduit et en laissant de 150 à 200 mm entre ces balles.

Pour le foin haché, suivre les conseils suivants :

- Hacher le foin en pièces de 50 mm ou plus afin de prévenir une densité excessive et une trop forte résistance au débit d'air.
- Charger le foin avec une soufflante ou un autre transporteur.
- Ne pas tasser le foin mouillé ou le concentrer dans une partie du séchoir. Déplacer souvent le tuyau de déchargement.
- Couvrir le plancher du séchoir de façon uniforme afin de favoriser une distribution égale de l'air.

5.7 *Fonctionnement du séchoir* La zone de séchage se déplace dans le foin dans la direction du débit d'air. Le foin au sommet du séchoir ne sèchera pas avant que celui en-dessous soit sec. Par conséquent, il importe d'empiler seulement dans le séchoir la quantité de foin mouillé que la zone de séchage pourra traverser dans une période permettant d'éviter la croissance de moisissures, c'est-à-dire : 3,5 jours pour un foin qui contient 20 % d'humidité et de 4 à 6 jours pour un degré d'humidité de 15 %.

La profondeur du foin humide qu'on peut empiler dans un séchoir varie directement en fonction du débit d'air dans le séchoir et des conditions atmosphériques dans la région. Par conséquent, l'expérience vous aide à déterminer le fonctionnement normal pour une installation donnée. Toutefois, en général, régler le chargement initial à une profondeur de 1,5 m. Ajouter ensuite un mètre par jour pour remplir le séchoir.

La zone de séchage se déplace à travers le foin indépendamment des fluctuations dans la qualité de l'air ambiant. Alors, faire fonctionner le ventilateur sans arrêt jusqu'à ce que le foin soit sec. L'arrêt du ventilateur retarde le séchage et permet au foin de se réchauffer. Si la température du foin s'élève, les risques de pertes de matière sèche et d'incendie augmentent de même que le taux de croissance des moisissures.

5.8 *Finition du séchage* Quand tout le foin semble sec, arrêter le ventilateur pour une période de 8 à 12 heures. Redémarrer alors le ventilateur et vérifier la qualité de l'air à la sortie. Si la température de l'air à la sortie dépasse celle de l'air ambiant, faire fonctionner le ventilateur plusieurs jours de plus et vérifier à nouveau les températures. Vous pouvez considérer que le foin est sec après trois vérifications n'ayant révélé aucune autre élévation de la température. Mettre alors le séchoir hors tension.

5.9 Séchage complémentaire à l'air chaud

Les séchoirs à air chaud de jour fonctionnent dans l'une des gammes de températures suivantes :

- les séchoirs à basse température fonctionnant à des températures de 5 à 10 °C au-dessus de celle de l'air ambiant
- les séchoirs à température moyenne fonctionnant à des températures de 10 à 200 °C au-dessus de celle de l'air ambiant
- les séchoirs à haute température fonctionnant à des températures de 300 à 800 °C au-dessus de celle de l'air ambiant

Les séchoirs à basse température haussent le taux de séchage en augmentant la capacité de l'air qui passe à travers le foin qu'on veut sécher. La hausse de la température de l'air fourni réduit l'humidité relative de l'air améliorant ainsi sa capacité de séchage. Cette méthode de séchage du foin nécessite un débit d'air moindre que pour le séchage à l'air naturel.

Certains exploitants utilisent la chaleur de la respiration du foin pour obtenir la chaleur supplémentaire nécessaire au séchage du foin et réduire le temps d'utilisation du ventilateur. Cette méthode rend possible une utilisation intermittente du ventilateur et permet au foin de se réchauffer entre les périodes de ventilation. Toutefois, la chaleur obtenue de cette façon cause des pertes de 4 à 5 % de la matière sèche du foin en train de sécher, une valeur qui dépasse les économies d'énergie réalisées. Aussi, il est risqué d'obtenir de la chaleur de cette façon. Par conséquent, il n'est pas recommandé d'utiliser le ventilateur de façon intermittente.

Installer les ventilateurs de manière à atténuer le bruit. Prendre aussi en considération la chaleur du soleil sur le côté sud du bâtiment. Voir la figure 19.

La figure 20 illustre la corrélation entre le temps requis pour que la formation des moisissures soit visible et la température du foin. Vu que la croissance des moisissures varie selon la température et l'humidité, la courbe se déplace vers la droite au fur et à mesure que le foin sèche.

Les séchoirs à température moyenne sont beaucoup moins communs que les séchoirs à basse température. Ils coûtent cher à construire et nécessitent des appareils de chauffage sophistiqués. Aussi, le taux de séchage rapide demande de plus nombreuses interventions par les exploitants en raison du chargement et déchargement plus fréquent des séchoirs. En outre, si le séchage ne se fait pas rapidement, le risque de dommages est élevé.

Il faut concevoir un séchoir à température moyenne avec un débit d'air, une température et une profondeur de foin qui permettront de sécher le foin assez rapidement pour éviter la formation de moisissures. Seuls des architectes qualifiés peuvent prendre les décisions concernant les conditions thermodynamiques et psychrométriques requises pour la conception des séchoirs à température moyenne.

Les séchoirs à haute température qui augmentent la température du foin à un degré assez élevé pour tuer les micro-organismes qui causent les dommages nécessitent une structure résistant à la chaleur. Ces séchoirs entraînent des coûts d'immobilisations très élevés. On les choisit seulement dans les cas où une exploitation continue permet de répartir les coûts en capital sur des milliers de tonnes de foin. Les séchoirs commerciaux fournissent normalement de l'air chauffé à des températures de 370 à 750 °C pour un foin dont le taux d'humidité varie entre 40 à 70 %. Le foin plus humide nécessite un séchage à des températures plus élevées. Les températures à la sortie s'élèvent habituellement de 65 à 120 °C.

Le foin séché à l'air chaud conserve plus sa valeur nutritive que celui séché autrement. Un séchage plus rapide offre de plus fortes concentrations de carotène, un meilleur goût et une plus grande conservation de la matière sèche. Toutefois, les avantages de l'accélération du séchage au moyen de la chaleur supplémentaire sont peut-être moins importants s'il faut aussi atteindre des objectifs autres que ceux qui portent sur la qualité du foin. Il importe d'étudier avec soin sur le plan financier l'utilisation de la chaleur supplémentaire avant de commencer la conception détaillée d'un système.

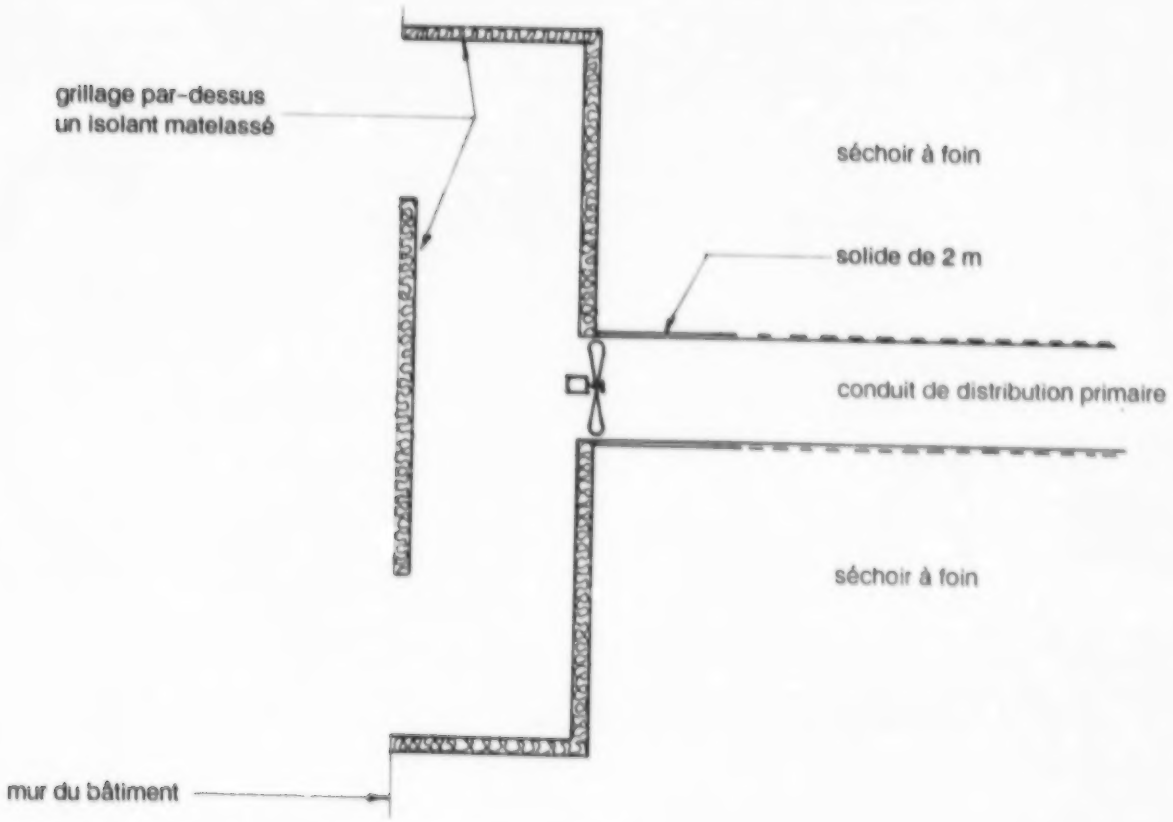


Fig. 19. Installation du ventilateur pour l'absorption du bruit.

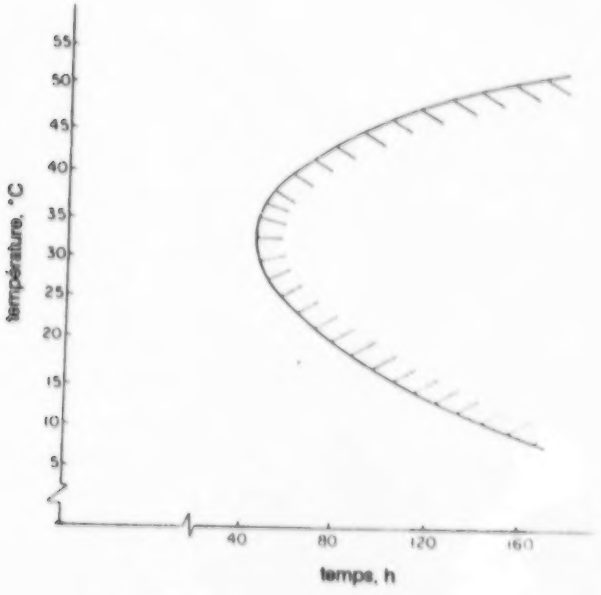


Fig. 20. Conséquences de la température et du temps d'entreposage sur la formation de moisissures dans le foin trop humide.

BIBLIOGRAPHIE ET AUTRES OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

Anderson, P.M., et autres. *Harvesting practices and round bale losses*. American Society of Agricultural Engineers.

Auiki, F.S.; Batchelder, D.G.; McLaughlin, G. 1979. *Forage drying : conditioning rolls, feed rate, and number of passes*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 79-1039.

Beard, J.T.; Arthur, J.H. 1985. *Ventilation concepts for insect control in grain storage*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 85-3517.

Borsum, J.C.; Bakker-Arkema, F.W.; Brook, R.C. 1982. *Micro-computer control of continuous flow dryers*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 82-6006

Cervinka, V., et autres. 1975. *Calibration systems for grain moistures meters*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 75-5013.

Chang, C.S., et autres. 1980. *Bulk properties of corn as affected by multiple point grain spreaders*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 80-3061.

Lutte contre les rats et les souris. 1979. Ottawa, Ont. : Publ. 1370 d'Agriculture Canada.

Duggal, A.K.; Muir, W.E.; Brooker, D.B. 1982. *Sorption equilibrium moisture contents of wheat kernels and chaff*. American Society of Agricultural Engineers.

Fairbanks, G.E.; Fransen, S.C.; Schrock, M.D. *Machine made stacks compared with round bales*. American Society of Agricultural Engineers.

Farm drying of milling wheat (Séchage du blé de mouture à l'exploitation agricole). Bulletin de la Commission canadienne du blé, numéro de janvier. Commission canadienne des grains.

Feldman, M.; Robertson, J.A.; Lievers, K.W. 1980. *Drying and storage of chopped hay with hay tower*. Société canadienne du génie agricole, document nº 80-220.

Fraser, B.M.; Muir, W.E. 1978 *Comparison of solar/natural air drying in Manitoba*. University of Manitoba Agricultural Engineering.

Friesen, O.; Huminicki, D.N. 1986. *Grain aeration and unheated air drying*. Agdex 732-1. Winnipeg, Man. : Ministère de l'Agriculture du Manitoba.

Friesen, O.H. 1984. *Evaluation of air delivery systems for grain bins, and air flow resistance characteristics*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 84-210.

Friesen, O.H. 1982. *Séchoirs à grains à air chaud*. Publ. 1700 d'Agric. Can.

Gorakhpurwalla, H.D.; McGinty, R.J.; Watson, C.A. 1975. *Determining moisture content of grain using microwave energy for drying*. J. Agric. Eng. Res. 20:314–325.

Grain grading handbook for western Canada (Guide sur le classement du grain pour l'Ouest canadien). 1984. Winnipeg, Man. : Commission canadienne des grains.

Gunasekaran, S.; Shove, G.C. 1983. *Optiumum fan operation for low temperature grain drying*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 83-3012.

Haque, E.; Foster, G.H.; Chung, D.S.; Lai, F.S. *Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines*. American Society of Agricultural Engineers.

Hellevang, K.J. 1982. *Crop dryer fires while drying sunflower*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 82-3563.

Huhnke, R.L.; Stevens, V.L. 1985. *Large round bale wheat hay storage*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 85-1031.

Hurburgh, C.R.; Paynter, L.M.; Schmitt, S.G.; Bern, C.J. 1985. *Performance of farm-type moisture meters*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 85-3008.

Jayas, D.S.; Sokhansanj, S. 1985. *Resistance to airflow of rapeseed (canola)*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 85-3516.

Kumar, A.; Muir, W.E. 1985 *Air flow resistance of wheat and barley*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 85-3515.

Loschiavo, S.R., édition et compilation des données. 1976. *Insectes, acariens et moisissures nuisibles aux grains entreposés à la ferme dans les provinces des Prairies*. Publ. 1595 d'Agric. Can.

Mittal, G.S.; Otten, L. 1982. *Simulation of low-temperature corn drying*. Can. Agr. Eng. 24(2):111–118.

Mittal, G.S.; Otten, L.; Brown, R.B. 1984. *Farm scale test of a micro-computer controlled low temperature corn drying system*. Can. Agric. Eng. 26(2):121–125.

Muhlbauer, W., et autres. 1982. *Comparison of low-temperature wheat drying management*

procedures. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 82-3006.

Okabe, T.; Huang, M.T.; Okamura, S. 1973. *Measurement of grain moisture content by use of microwaves*. J. Agric. Eng. Res. 18:59–66.

Otten, L.; Brown, R.B. 1980. *Comparison of a high temperature and a combination drying system*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 80-102.

Raisanen, W. 1979. *Motorola microprocessor-based moisture tester*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 79-5029.

Sankat, C.K.; Bilanski, W.K. 1980 *Ammoniation of corn stover stacks to improve feed value*. Can. Agric. Eng. 22:77–80.

Savoie, P.; Marcoux, A. 1982. *Technological choices in forage harvest and conservation*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 84-1525.

Scott, D.W. 1980. *Performance of grain dryers under actual field conditions*. Société canadienne du génie agricole. Document nº 80-103.

Singh, D.; Sokhansanj, S.; Middleton, B. 1983. *Drying characteristics of wheat, barley and canola at low temperatures*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. CNR 83-207.

Sinha, R.N. 1971. *Dégâts causés aux céréales entreposées à la ferme par les moisissures, les insectes et les acariens dans l'Ouest canadien*. Publ. 1437 d'Agric. Can.

Sirohi, U.S : Koegal, R.G.; Straub, R.J. 1983. *Electrical treatments to increase forage drying rates*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 83-1528.

Smith, P.A.; Sistler, F.E. 1983. *A grain dryer monitor/controller*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 83-3031.

Sokhansanj, S.; Zhijie, W.; Jayas, D.S.; Kameska, T. 1985. *Equilibrium moisture of rapeseed at temperatures between 5–20°C*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 85-3512.

Sokhansanj, S.; Bakker-Arkema, F.W. 1981. *Waste heat recovery in grain dryers*. American Society of Agricultural Engineers.

Stephens, L.E.; Foster, G.H. 1978. *Bulk properties of wheat and grain sorghum as affected by mechanical grain spreader*. American Society of Agricultural Engineers.

Stephens, L.E.; Foster, G.H. 1976. *Grain bulk properties as affected by mechanical spreaders*. American Society of Agricultural Engineers.

Thorastic, J.H.; Lapp, H.M.; Madrid, F.J. *Stored wheat insect responses to changes in their physical environment*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. NCR 85-503.

Wasserman, J.D., et autres. 1984. *Heated air grain dryer performance*. Société canadienne du génie agricole. Document nº 84-211.

Watts, K.C., et autres. 1984. *Comparison of drying corn using sodium and calcium bentonite*. Société canadienne du génie agricole. Document nº 84-205.

Wilcke, W.F.; Bern, C.J. 1984. *Natural air corn drying with stirring : I. Effects of stirring*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 84-3519.

Wilcke, W.F.; Bern, C.J. 1984. *Natural air corn drying with stirring : II. Management*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 84-3520.

Wishna, S. 1984. *Development of performance standards for grain moisture meters*. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 84-6512.